

**PERILAKU TERMAL DAN KINETIKA REAKSI PADA PROSES
PIROLISIS SAMPAH PLASTIK HDPE DENGAN KATALIS MnFe_2O_4**

TESIS

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK MESIN
MINAT KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Magister Teknik



**RITA FAJAR WATI
NIM. 166060200111012**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2018**

TESIS

PERILAKU TERMAL DAN KINETIKA REAKSI PADA PROSES PIROLISIS SAMPAH PLASTIK HDPE DENGAN KATALIS $MnFe_2O_4$


Oleh:

RITA FAJAR WATI
NIM. 166060200111012

Telah dipertahankan didepan penguji
Pada tanggal 11 Juli 2018
Dinyatakan telah memenuhi syarat
untuk memperoleh gelar Magister Teknik Mesin

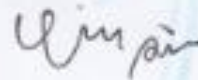
Komisi Pembimbing,

Pembimbing Utama



Prof. Ir. ING. Wardana, M.Eng., Ph.D.

Pembimbing Pendamping



Winarto, ST., MT., Ph.D.

Malang, 25 JUL 2018

Universitas Brawijaya
Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin
Kerjasama Program Studi Magister Teknik Mesin



Dr. Eng. Lilis Yulianti, S.T., M.T.
NIP. 197507022000032001

JUDUL TESIS:

PERILAKU TERMAL DAN KINETIKA REAKSI PADA PROSES PIROLISIS SAMPAH PLASTIK HDPE DENGAN KATALIS MnFe_2O_4

Nama Mahasiswa : Rita Fajar Wati
Nim : 166060200111012
Program Studi : Teknik Mesin
Mimat : Konversi Energi

KOMISI PEMBIMBING

Ketua : Prof. Ir. I. N. G. Wardana, M.Eng., Ph.D.
Anggota : Winarto, S.T., M.T., Ph.D.

TIM PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Dr. Eng. Widya Wijayanti, S.T., M.T.
Dosen Penguji 2 : Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, S.T., M.Eng.

Tanggal Ujian : 11 Juli 2018
SK. Penguji :

PERNYATAAN ORISINALITAS TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Tesis ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Tesis dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, Pasal 25 ayat 2 dan pasal 70)

Malang, 11 Juli 2018

Mahasiswa,



Nama : Rita Fajar Wati

NIM : 166060200111012

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Rita Fajar Wati, lahir di Tulungagung pada tanggal 15 Mei 1994 dari orang tua Ibu Suparmi dan Bapak Supardi (Alm.). Pendidikan dasar hingga sekolah menengah atas ditempuh di Tulungagung. Pendidikan dasar ditempuh di SDN 3 Ngunggahan, lulus tahun 2006. Kemudian melanjutkan pendidikan di SMPN 1 Bandung dan SMAN 1 Gondang yang masing-masing diselesaikan pada tahun 2009 dan 2012. Pada tahun 2012 melanjutkan pendidikan Sarjana di Jurusan Teknik Mesin Universitas Negeri Malang, lulus tahun 2016. Di tahun yang sama melanjutkan pendidikan Magister di Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya dan diselesaikan pada tahun 2018.

Malang, 11 Juli 2018

Penulis,

Rita Fajar Wati

UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah SWT karena atas segala limpahan berkah, rahmat dan hidayahNya sehingga tesis ini dapat terselesaikan dengan baik dan tepat waktu. Atas terselesaikannya tesis ini, penulis sampaikan banyak terimakasih kepada:

1. Ibunda Suparmi dan Ayah Supardi (Alm.) serta keluarga tercinta di Tulungagung yang senantiasa memberikan doa, dukungan, biaya dan motivasi dalam menyelesaikan tesis ini.
2. Prof Ir. I. N. G.Wardana, M. Eng., Ph.D. dan Bapak Winarto, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing tesis yang senantiasa memberikan bimbingan, arahan, bantuan serta motivasi dalam keberhasilan penyusunan tesis ini.
3. Ibu Dr. Eng. Widya Wijayanti, S.T., M.T. dan Bapak Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, S.T., M. Eng. Selaku dosen penguji tesis yang telah memberikan bimbingan dan masukan untuk menyempurnakan tesis ini.
4. Rektor Universitas Brawijaya dan seluruh civitas akademik Fakultas Teknik dan Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
5. Bapak Dr. Sukarni S.T., M.T. dan Ibu RR. Poppy Puspitasari, S.Pd., M.T., Ph.D. dari Universitas Negeri Malang yang telah banyak memberikan bimbingan, arahan dan bantuan dalam keberhasilan penyusunan tesis ini.
6. Nanomaterial Laboratory Jurusan Teknik Mesin Universitas Negeri Malang, Laboratorium Material dan Mineral Maju Fakultas MIPA Universitas Negeri Malang, Laboratorium Energi Institut Teknologi Sepuluh Nopember dan Laboratorium Motor Bakar Universitas Brawijaya sebagai sarana melakukan eksperimen dan pengujian-pengujian terhadap material yang digunakan dalam penelitian ini.
7. Rekan-rekan dari Universitas Negeri Malang dan Institut Teknologi Sepuluh Nopember yaitu Ardianto Prasetyo, S.T., Wachid Dhimar Nur Salim, S.T., Linda Kusumawati, S. Si., Anis Khoirun Nisa, S.Pd., M.Si., Siti Maryam, S.Si., M.Si. dan Rizqiana Yogi Cahyaningtyas, S.Pd., M.T. yang banyak memberikan bantuan dalam keberhasilan penyusunan tesis ini.

8. Rekan-rekan S2 teknik mesin UB angkatan 2016 yaitu Willy Artha Wirawan, S.T., M.T., A'yan Sabitah, S.T., M.T., Setyawan Dwi Nugroho, S.T., M.T., Ricky Indriyanto, S.T., M.T., Ahmad Akromul Huda, S.T., M.T., Achmad Fauzi, S.T., M.T., Gufron Saiful Bachri, S.T., M.T., M. Fakhruddin, S.T., M.T. dan Suteja, S.T., M. T
9. Kakak tingkat teknik mesin UB yaitu Aryati Muhaymin Marali, S.T., M.T. dan Hilmi Iman Firmansyah, S.T., M.T.
10. Rekan-rekan kos Teram V/5 lantai 2

Serta seluruh rekan-rekan yang terlibat dalam penyusunan tesis ini yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu. Semoga Allah SWT senantiasa memberikan balasan amal kebaikan yang tiada tara. Aaaamiiiiinnn...

Malang, 11 Juli 2018

Penulis,

Rita Fajar Wati

RINGKASAN

Rita Fajar Wati, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Juli 2018, Perilaku Termal Dan Kinetika Reaksi Pada Proses Pirolisis Sampah Plastik HDPE Dengan Katalis MnFe_2O_4 , Dosen Pembimbing: I. N. G. Wardana dan Winarto.

Salah satu permasalahan serius yang tengah dihadapi banyak negara, termasuk Indonesia adalah sampah. Sampah plastik HDPE (*High Density Polyethylene*) merupakan salah satu jenis sampah plastik yang paling sulit terdegradasi karena memiliki rantai polimer panjang dengan sedikit cabang. Hal ini menyebabkan sampah plastik HDPE bersifat kuat dan sulit terdegradasi, sehingga memerlukan perlakuan khusus dalam pengelolaannya.

Permasalahan lain yang tengah dihadapi oleh banyak negara saat ini adalah masalah energi. Hal ini karena persediaan bahan bakar fosil dunia semakin menipis. Salah satu solusi yang tepat untuk menyelesaikan kedua permasalahan ini adalah dengan proses pirolisis dan salah satu cara untuk menghemat energi dalam proses pirolisis adalah dengan penambahan katalis.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui peran nanokatalis MnFe_2O_4 pada proses pirolisis sampah plastik HDPE dan pengaruh laju pemanasan terhadap kinerja nanokatalis MnFe_2O_4 pada proses pirolisis sampah plastik HDPE. Penelitian ini dimulai dengan mengumpulkan sampel sampah plastik HDPE, kemudian sampel dicuci, dikeringkan dan dihancurkan hingga berbentuk serbuk, kemudian disaring dan diambil ukuran 60mesh. Selanjutnya dilakukan beberapa pengujian terhadap sampel yang meliputi uji proksimat, uji SEM-EDX, uji nilai kalor dan uji dekomposisi pirolisis terhadap sampel.

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa nanokatalis MnFe_2O_4 mempercepat laju penyusutan massa proses pirolisis sampah plastik HDPE hanya sampai di bawah batas kestabilan termalnya. Ketika nanokatalis MnFe_2O_4 sudah mendekati dan memasuki batas kestabilan termalnya, maka performa katalitiknya semakin melemah sehingga tidak banyak membantu pada proses pirolisis sampah plastik HDPE.

Nanokatalis MnFe_2O_4 menunjukkan performa katalitik yang baik pada proses pirolisis sampah plastik HDPE pada *heating rate* 10°C/min, 15°C/min dan 20°C/min yaitu meningkatkan laju penyusutan massa pada proses pirolisis sampah plastik HDPE. Tetapi pada *heating rate* yang lebih tinggi lagi yaitu 25°C/min, nanokatalis MnFe_2O_4 tidak banyak membantu pada proses pirolisis sampah plastik HDPE.

Kata kunci : *HDPE, nanokatalis MnFe_2O_4 , pirolisis, heating rates, dekomposisi*

SUMMARY

Rita Fajar Wati, *Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Brawijaya University, 2018 July, Thermal Behaviour and Kinetic Reaction of HDPE Plastic Waste Pyrolysis With MnFe_2O_4 Catalyst, Academic Supervisor: I. N. G. Wardana and Winarto.*

One of the most serious problems faced by many countries, including Indonesia is waste. HDPE (High Density Polyethylene) plastic waste is one of the most difficult degraded plastic waste types because it has long linear polymer chain with few branches. This causes HDPE plastic waste has strong characteristic and difficult to be degraded. Thus, it requires special treatment to manage.

Another problem faced by many countries nowadays is energy. It is because the world fossil fuels supply is running low. One convenient solution to solve these two problems is pyrolysis and one way to save energy in the pyrolysis process is by catalyst addition.

This study aims to get information the role of MnFe_2O_4 nanocatalyst on HDPE plastic waste pyrolysis and effects of heating rates on the performance of MnFe_2O_4 nanocatalyst in the HDPE plastic waste pyrolysis.

This study began by collected HDPE plastic waste sample, then the sample was washed, dried and crushed to be powder, then filtered by sieve 60mesh. After that, several tests were conducted on the sample including proximate test, SEM-EDX test, calorific value test and pyrolysis decomposition test.

The results of this study indicate that MnFe_2O_4 nanocatalyst increases the mass loss rate of HDPE plastic waste pyrolysis when the pyrolysis temperature is lower than thermal stability limit of the nanocatalyst. When the pyrolysis temperature is higher than temperature of MnFe_2O_4 thermal stability limit, then catalytic performance of MnFe_2O_4 decreases. Therefore, it doesn't help much in HDPE plastic waste pyrolysis.

MnFe_2O_4 nanocatalyst shows good catalytic performance on HDPE plastic waste pyrolysis at heating rates $10^\circ\text{C}/\text{min}$, $15^\circ\text{C}/\text{min}$ and $20^\circ\text{C}/\text{min}$, which increases the mass loss rate of HDPE plastic waste pyrolysis. However, at higher heating rate, i.e at $25^\circ\text{C}/\text{min}$, MnFe_2O_4 doesn't help much in the HDPE plastic waste pyrolysis.

Keywords : *HDPE, MnFe_2O_4 nanocatalyst, pyrolysis, heating rates, decomposition*

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur kehadiran Allah SWT karena atas limpahan rahmat, berkah dan hidayahNya sehingga karya Tesis dengan judul “ Perilaku Termal Dan Kinetika Reaksi Pada Proses Pirolisis Sampah Plastik HDPE Dengan Katalis MnFe_2O_4 ” ini dapat diselesaikan dengan baik dan tepat waktu.

Tesis ini merupakan salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik Mesin di Universitas Brawijaya, sehingga penulis berharap karya tesis ini dapat memberikan manfaat dan menjadi tambahan sumber ilmu pengetahuan serta pengembangan penelitian tentang pengolahan sampah plastik, khususnya sampah plastik HDPE menjadi sumber bahan bakar dengan menggunakan tambahan nanokatalis.

Tidak lupa saya sampaikan banyak terimakasih kepada seluruh pihak yang telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung dalam keberhasilan penyusunan tesis ini.

Penulis sangat menyadari bahwa masih ada banyak kekurangan dalam tesis ini baik dari segi bahasa, penulisan maupun isi. Untuk itu, penulis sangat berharap adanya kritik dan saran yang membangun dari para pembaca agar tesis ini menjadi lebih baik lagi. Terimakasih..

Penulis,

Rita Fajar Wati

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
IDENTITAS TIM PENGUJI.....	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS	iv
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	v
UCAPAN TERIMA KASIH	vi
RINGKASAN.....	viii
SUMMARY	ix
KATA PENGANTAR	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah	3
1.3 Rumusan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Terdahulu.....	5
2.2 Plastik HDPE (<i>High Density Polyethylene</i>)	6
2.3 Nanokatalis MnFe_2O_4	7
2.4. Pirolisis	10
2.5 Nitrogen	10
2.6 Kinetika Reaksi dan Energi Aktivasi	10
2.6.1 Kinetika Reaksi	10
2.6.2 Parameter Kinetik.....	11
BAB III KERANGKA KONSEP PENELITIAN	13
3.1. Konsep Cara Kerja Katalis Berdasarkan Teori	13
BAB IV METODE PENELITIAN.....	19
4.1. Rancangan Penelitian	19

4.2. Populasi dan Sampel	19
4.3. Instrumen Penelitian.....	19
4.3.1 Instrumen Pengumpulan Data	20
4.4. Tahap-Tahap Pelaksanaan Penelitian.....	20
4.4.1 Tahap Persiapan Penelitian	20
4.4.2 Tahap Pelaksanaan Penelitian	21
4.5 Teknik Analisis Data.....	24
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN	25
5.1. Deskripsi Data	25
5.2 Kandungan Sifat Fisik Sampah Plastik HDPE (<i>High Density Polyethylene</i>)	25
5.3 Kandungan Sifat Kimia Sampah Plastik HDPE.....	27
5.4. Nilai Kalor Sampah Plastik HDPE	28
5.5 Dekomposisi Termal Pirolisis Sampah Plastik HDPE Tanpa dan Dengan Penambahan Nanokatalis MnFe_2O_4	29
5.5.1 Hasil Uji Termogravimetri Sampah Plastik HDPE.....	29
5.5.2 Hasil Uji Termogravimetri Sampah Plastik HDPE Dengan Penambahan Nanokatalis MnFe_2O_4	38
5.5.3 Perbandingan Temperatur Awal dan Akhir Tahap Dekomposisi Pirolisis Sampah Plastik HDPE Tanpa dan Dengan Penambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 Pada Variasi <i>Heating Rate</i>	48
5.5.4 Perbandingan Laju Penyusutan Massa Pada Pirolisis Sampah Plastik HDPE Tanpa dan Dengan Tambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 Pada Variasi <i>Heating Rate</i>	51
5.5.5 Perbandingan Temperatur Puncak Tahap Dekomposisi Pirolisis Sampah Plastik HDPE Tanpa dan Dengan Penambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 Pada Variasi <i>Heating Rate</i>	57
5.5.6 Perbandingan Residu yang Tersisa Pada Proses Pirolisis Sampah Plastik HDPE Tanpa dan Dengan Penambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 Pada Variasi <i>Heating Rate</i>	59
5.6. Kinetika Pirolisis	59
5.6.1 Menghitung Mass Loss (%)	60
5.6.2 Menghitung $1/T$ (Kelvin/K) dan α	60
5.6.3 Menghitung Kemiringan/ <i>Slope</i>	64
5.7 Menghitung Energi Aktivasi	70

5.7.1 Metode Flynn Wall-Ozawa (FWO).....	70
5.7.2 Metode Vyazovkin	71
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	75
6.1 Kesimpulan.....	75
6.2 Saran	75
DAFTAR PUSTAKA	77
LAMPIRAN	80

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 4.1	Instrumen pengumpulan data	20
Tabel 5.1	Hasil uji proksimat sampah plastik HDPE.....	26
Tabel 5.2	Perbandingan hasil analisis proksimat (sifat fisik) sampah plastik HDPE dengan batubara lignit dari Wuchang, China.....	26
Tabel 5.3	Kandungan unsur kimia sampah plastik HDPE.....	27
Tabel 5.4	Hasil uji nilai kalor sampah plastik HDPE	28
Tabel 5.5	Perbandingan nilai kalor sampah plastik HDPE dengan beberapa material lain	28
Tabel 5.6	Pergeseran temperatur awal dan akhir dekomposisi sampah plastik HDPE	34
Tabel 5.7	Laju penyusutan massa maksimum pirolisis sampah plastik HDPE pada variasi <i>heating rate</i>	36
Tabel 5.8	Pergeseran temperatur puncak tahap dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE pada variasi <i>heating rate</i>	37
Tabel 5.9	Residu pada proses pirolisis sampah plastik HDPE pada variasi <i>heating rate</i>	38
Tabel 5.10	Pergeseran temperatur awal dan akhir tahap dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE pada variasi <i>heating rate</i>	44
Tabel 5.11	Laju penyusutan massa pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada variasi <i>heating rate</i>	46
Tabel 5.12	Pergeseran temperatur puncak tahap dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada variasi <i>heating rate</i>	47
Tabel 5.13	Residu pada proses pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada variasi <i>heating rate</i>	48
Tabel 5.14	Perbandingan temperatur awal dan akhir tahap dekomposisi pirolisis Sampah plastik HDPE tanpa dan dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada variasi <i>heating rate</i>	49
Tabel 5.15	Laju penyusutan massa pirolisis sampah plastik HDPE tanpa dan dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada variasi <i>heating rate</i>	51

Tabel 5.16	Perbandingan temperatur puncak tahap dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE tanpa dan dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada variasi <i>heating rate</i>	57
Tabel 5.17	Perbandingan residu yang tersisa pada proses pirolisis sampah plastik HDPE tanpa dan dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada variasi <i>heating rate</i>	59
Tabel 5.18	Parameter kinetik pirolisis sampah plastik HDPE dengan <i>heating rate</i> $10^\circ\text{C}/\text{min}$	60
Tabel 5.19	Parameter kinetik pirolisis sampah plastik HDPE dengan <i>heating rate</i> $15^\circ\text{C}/\text{min}$	61
Tabel 5.20	Parameter kinetik pirolisis sampah plastik HDPE dengan <i>heating rate</i> $20^\circ\text{C}/\text{min}$	61
Tabel 5.21	Parameter kinetik pirolisis sampah plastik HDPE dengan <i>heating rate</i> $25^\circ\text{C}/\text{min}$	62
Tabel 5.22	Parameter kinetik pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada <i>heating rate</i> $10^\circ\text{C}/\text{min}$	62
Tabel 5.23	Parameter kinetik pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada <i>heating rate</i> $15^\circ\text{C}/\text{min}$	63
Tabel 5.24	Parameter kinetik pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada <i>heating rate</i> $20^\circ\text{C}/\text{min}$	63
Tabel 5.25	Parameter kinetik pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada <i>heating rate</i> $25^\circ\text{C}/\text{min}$	64
Tabel 5.26	Nilai α , β , $\ln\beta$ dan $1/T$ pada pirolisis sampah plastik HDPE.....	65
Tabel 5.27	Hasil plotting $\ln\beta$ vs $1/T$ pada sampah plastik HDPE dengan metode FWO	65
Tabel 5.28	Nilai α , β , $\ln\beta$ dan $1/T$ pada pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4	66
Tabel 5.29	Hasil plotting $\ln\beta$ vs $1/T$ pada sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 dengan metode FWO	67
Tabel 5.30	Nilai α , β , $\ln\beta$, $1/T$ dan $\ln(\beta/T^2)$ sampah plastik HDPE.....	67
Tabel 5.31	Nilai α , β , $\ln\beta$, $1/T$ dan $\ln(\beta T^2)$ sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4	68
Tabel 5.32	Hasil plotting $\ln(\beta/T^2)$ vs $1/T$ pada sampah plastik HDPE dengan metode Vyazovkin	69

Tabel 5.33	Hasil plotting $\ln(\beta/t^2)$ vs $1/T$ pada sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 dengan metode Vyazovkin	70
Tabel 5.34	Nilai energi aktivasi pada masing-masing α proses pirolisis sampah plastik HDPE dengan metode FWO	71
Tabel 5.35	Nilai energi aktivasi pada masing-masing α proses pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 dengan metode FWO.....	71
Tabel 5.36	Nilai energi aktivasi pada masing-masing tingkat konversi (α) pada proses pirolisis sampah plastik HDPE dengan metode Vyazovkin	72
Tabel 5.37	Nilai energi aktivasi pada masing-masing tingkat konversi (α) pada proses pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 dengan metode Vyazovkin	72

DAFTAR GAMBAR

No	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Rumus struktur monomer HDPE.....	7
Gambar 2.2	Struktur Polimer HDPE.....	7
Gambar 2.3	Susunan atom Mn, Fe dan O pada ferrimagnetik	8
Gambar 3.1	Proses terbentuknya radikal bebas pada saat HDPE dipanaskan pada proses pirolisis	13
Gambar 3.2	Susunan atom Mn, Fe dan O pada ferrimagnetik	14
Gambar 3.3	Ilustrasi reaksi antara molekul HDPE dengan katalis MnFe_2O_4	17
Gambar 4.1	Tahap pelaksanaan penelitian	23
Gambar 5.1	Pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan <i>heating rate</i> 10°C/menit	30
Gambar 5.2	Pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan <i>heating rate</i> 15°C/menit	31
Gambar 5.3	Pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan <i>heating rate</i> 20°C/menit	32
Gambar 5.4	Pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan <i>heating rate</i> 25°C/menit	33
Gambar 5.5	Pergeseran temperatur awal dan akhir tahap dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE pada variasi <i>heating rate</i>	35
Gambar 5.6	Laju penyusutan massa maksimum proses pirolisis sampah plastik HDPE pada variasi <i>heating rate</i>	36
Gambar 5.7	Pergeseran temperatur puncak tahap dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE pada variasi <i>heating rate</i>	37
Gambar 5.8	Pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada <i>heating rate</i> 10°C/menit.....	39
Gambar 5.9	Pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada <i>heating rate</i> 15°C/menit.....	40
Gambar 5.10	Pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada <i>heating rate</i> 20°C/menit.....	42
Gambar 5.11	Pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada <i>heating rate</i> 25°C/menit.....	43

Gambar 5.12	Pergeseran temperatur awal dan akhir tahap dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada variasi <i>heating rate</i>	45
Gambar 5.13	Laju penyusutan massa pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada variasi <i>heating rate</i>	46
Gambar 5.14	Pergeseran temperatur puncak tahap dekomposisi sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada variasi <i>heating rate</i>	47
Gambar 5.15	Perbandingan temperatur awal dekomposisi sampah plastik HDPE tanpa dan dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada variasi <i>heating rate</i>	49
Gambar 5.16	Perbandingan temperatur akhir dekomposisi sampah plastik HDPE tanpa dan dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada variasi <i>heating rate</i>	50
Gambar 5.17	Laju penyusutan massa pada proses pirolisis sampah plastik HDPE tanpa dan dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada variasi <i>heating rate</i>	51
Gambar 5.18	Perbandingan laju penyusutan massa maksimum proses pirolisis sampah plastik HDPE tanpa dan dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada <i>heating rate</i> (a) $10^\circ\text{C}/\text{min}$, (b) $15^\circ\text{C}/\text{min}$, (c) $20^\circ\text{C}/\text{min}$, (d) $25^\circ\text{C}/\text{min}$	52
Gambar 5.19	Pergeseran temperatur puncak dekomposisi proses pirolisis sampah plastik HDPE tanpa dan dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada <i>heating rate</i> (a) $10^\circ\text{C}/\text{min}$, (b) $15^\circ\text{C}/\text{min}$, (c) $20^\circ\text{C}/\text{min}$, (d) $25^\circ\text{C}/\text{min}$	58
Gambar 5.20	<i>Slope</i> dan <i>intercept</i> antara $\ln\beta$ vs $1/T$ pada sampah plastik HDPE	65
Gambar 5.21	<i>Slope</i> dan <i>intercept</i> antara $\ln\beta$ vs $1/T$ pada sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4	66
Gambar 5.22	<i>Slope</i> dan <i>intercept</i> antara $\ln(\beta/T^2)$ dan $1/T$ pada sampah plastik HDPE	68
Gambar 5.23	<i>Slope</i> dan <i>intercept</i> antara $\ln(\beta/T^2)$ dan $1/T$ pada sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4	69

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu permasalahan serius yang tengah dihadapi banyak negara, termasuk Indonesia adalah sampah. Sampah dihasilkan dari aktivitas manusia, sehingga produksi sampah akan semakin bertambah seiring dengan pertambahan jumlah penduduk. Sampah yang dihasilkan dari aktivitas manusia ini jenisnya bermacam-macam, termasuk salah satunya adalah sampah plastik. Sampah plastik termasuk jenis sampah anorganik yang sulit terurai meski dalam waktu jutaan tahun. Sampah plastik jenisnya bermacam-macam, dan salah satu jenis sampah plastik adalah plastik HDPE. HDPE (*High Density Poliethilene*) merupakan salah satu jenis plastik *polyetehylene* yang memiliki rantai polimer panjang dengan sedikit cabang, sehingga memiliki sifat yang kuat. HDPE digunakan secara luas sebagai botol susu, botol oli, mainan, dll. Berbagai aplikasi HDPE ini berkontribusi sebesar 17,6% pada kategori sampah plastik dan merupakan jenis plastik terbesar urutan ke 3 pada sampah padat perkotaan (Sharuddin, et al., 2016).

Selain itu, pertumbuhan dan perkembangan ekonomi juga meningkatkan ketergantungan masyarakat terhadap plastik. Akibatnya, terjadi penumpukan plastik di TPA yang lama-kelamaan akan membahayakan kesehatan lingkungan dan masyarakat sekitar karena memungkinkan terjadinya ledakan dan kontaminasi air dan tanah.

Disisi lain, dengan pertambahan jumlah penduduk, maka ketersediaan energi juga semakin menipis. Sumber energi yang paling banyak digunakan manusia saat ini adalah dari batubara dan minyak bumi, yang keduanya merupakan sumber daya alam yang tidak dapat diperbarui, sehingga suatu saat pasti akan habis. Sehingga sangat diperlukan adanya solusi yang tepat untuk kedua permasalahan tersebut.

Salah satu teknik untuk pengelolaan sampah yang dapat menyelesaikan permasalahan polusi sampah dan dapat mengurangi volume sampah dalam jumlah yang besar adalah dengan proses pirolisis. Pirolisis adalah proses termokimia yang terjadi pada kondisi tanpa oksigen yang menghasilkan produk berupa char, minyak dan gas (Liu et al., 2016). Pengelolaan sampah plastik dengan pirolisis akan memberikan keuntungan berlipat ganda. Pertama, dapat mengurangi volume sampah dalam jumlah besar dengan meminimalkan emisi CO dan CO₂ dibandingkan dengan proses pembakaran dan gasifikasi. Keuntungan

lainnya, yaitu pengelolaan sampah plastik dengan pirolisis dapat menghasilkan sumber bahan bakar baru berupa car, tar atau gas.

Beberapa penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan Pirolisis HDPE menyatakan bahwa Energi Aktivasi pirolisis HDPE sebesar 147,25 kJ/mol (Salem and Lettieri, 2010), 242,13kJ/mol – 278,14kJ/mol (Chin et al., 2014). Energi aktivasi adalah energi minimum yang dibutuhkan untuk memulai suatu reaksi kimia (Fang et al., 2016). Jadi, semakin kecil energi aktivasi, maka suatu reaksi akan lebih mudah terjadi. Salah satu cara untuk menurunkan energi aktivasi dalam sebuah reaksi adalah dengan penambahan katalis. Katalis yang sering digunakan dalam proses pirolisis maupun pembakaran antara lain zeolit jenis HUSY, HZSM-5 dan HMOR. Hasilnya HZSM-5 lebih efektif daripada jenis katalis yang lain dengan residu yang ditinggalkan hanya sebesar 4,53wt% (Salem et al., : 2017). Katalis ZnO, Fe₂O₃ CuO dan Al₂O₃, dimana, seluruh katalis mempercepat dekomposisi *biowaste*, karet dan komponen plastik, sehingga meningkatkan karakteristik pengapian dan pembakaran MSW (Liu et al., 2016). Katalis MgO, Al₂O₃ dan ZnO, dapat mengurangi energi aktivasi dari proses pirolisis MSW (Fang et al., 2016).

Seiring dengan perkembangan sains dan teknologi, terobosan baru yang berkaitan dengan bidang katalis yaitu adanya nanokatalis, yaitu katalis yang berukuran nanometer (nanomaterial). Nanomaterial memiliki fraksi permukaan atom yang luas per unit volume. Sedangkan total energy permukaan (*surface energy*) meningkat dengan peningkatan keseluruhan area permukaan), dimana hal ini sangat ditentukan oleh dimensi (ukuran) material. Perubahan ukuran partikel dari sentimeter (cm) menjadi nanometer (nm) meningkatkan area permukaan dan *surface energy* sebesar tujuh kali lipat (Cao, 2004:15-16). Salah satu nanokatalis yang memiliki banyak kelebihan yaitu MnFe₂O₄. MnFe₂O₄ adalah material komposit spinel dengan struktur lattice kubus dan *face centered*. Unsur logam transisi Mn dan Fe terletak pada celah tetrahedral dan oktahedral dan memiliki ikatan ionik yang kuat, gaya konduktivitas termal dan *thermal expansion* dengan intensitas yang sama antara ion logam dan ion oksigen. Karena struktur kristal alami inilah MnFe₂O₄ digunakan sebagai katalis (Aijun et al., 2011).

Katalis MnFe₂O₄ berfungsi efektif untuk menyerap merkuri dalam kontrol emisi di pembangkit listrik tenaga batu bara, karena memiliki kapasitas penyerapan yang tinggi dan memiliki sifat dapat diperbarui (Yang et al., 2017). Katalis MnFe₂O₄ juga menunjukkan

performa katalitik yang baik untuk dekomposisi termal Ammonium Perchlorate, dimana kinerja katalitik ini lebih baik daripada nanometal Ni, nano alloy NiB dan nano metal oxide Fe_2O_3 (Aijun et al., 2011).

Berdasarkan data penelitian sebelumnya, belum pernah ada penelitian yang menggunakan nanokatalis MnFe_2O_4 pada proses pirolisis polimer khususnya HDPE. Dan berdasarkan sifat yang dimiliki, nanokatalis MnFe_2O_4 sangat berpotensi untuk membantu mempercepat proses dekomposisi termal pada pirolisis HDPE, sehingga menjadikan proses pirolisis HDPE lebih efektif dan juga menurunkan energi aktivasi. Oleh sebab itu, peneliti tertarik untuk melakukan penelitian dengan judul

PERILAKU TERMAL DAN KINETIKA REAKSI PADA PROSES PIROLISIS SAMPAH PLASTIK HDPE DENGAN KATALIS MnFe_2O_4

dengan harapan dapat diperoleh solusi untuk persoalan sampah, khususnya plastik HDPE menjadi energi (*waste to energy*) dengan cara dan metode yang lebih efisien.

1.2 Identifikasi Masalah

1. Indonesia merupakan negara urutan ke 2 dunia sebagai penghasil sampah plastik ke laut yaitu 187,2 juta ton setelah Cina yang mencapai 262,9 juta ton (Jambeck et al., 2015).
2. Sampah plastik yang terlalu menumpuk di TPA akan mencemari lingkungan. Menyebabkan polusi udara, kontaminasi air dan tanah dan memungkinkan terjadinya ledakan sampah.
3. Sampah plastik khususnya plastik HDPE memiliki rantai polimer yang linier dan panjang, sehingga lebih sulit terdekomposisi daripada jenis sampah plastik yang lain (Sharuddin et al., 2016).
4. Berbagai variasi aplikasi HDPE berkontribusi sebesar 17,6% pada kategori sampah plastik dan merupakan jenis sampah plastik paling banyak urutan ke 3 dalam sampah padat perkotaan (Sharuddin et al., 2016).
5. Persediaan bahan bakar fosil di dunia sudah sangat menipis, dimana persediaan batu bara yang tersisa di dunia hanya tinggal 1.139 milyar ton, gas alam 187 trilyun m^3 dan minyak mentah 1.707 milyar barel. Dimana, persediaan bahan bakar fosil tersebut masing-masing diperkirakan hanya mampu mencukupi kebutuhan penggunaanya sampai tahun 2169, 2068 dan 2066 (British Petroleum, 2017).

6. Berdasarkan penelitian sebelumnya, katalis yang digunakan dalam proses pirolisis hanya pada kisaran MnO , Al_2O_3 , ZnO , AlCl_3 dan Zeolit. Masih sangat jarang katalis MnFe_2O_4 digunakan dalam proses pirolisis, padahal katalis MnFe_2O_4 memiliki performa katalitik yang baik (Aijun et al. 2011) dan momen magnetik yang besar, yang menguntungkan jika digunakan dalam proses termokimia.

1.3 Rumusan Masalah

Dari latar belakang yang telah dipaparkan, maka dapat diambil rumusan masalah sebagai berikut.

1. Bagaimana peran nanokatalis MnFe_2O_4 pada proses pirolisis sampah plastik HDPE?
2. Bagaimana pengaruh laju pemanasan terhadap kinerja nanokatalis MnFe_2O_4 pada proses pirolisis sampah plastik HDPE?

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk.

1. Mengetahui peran nanokatalis MnFe_2O_4 pada proses pirolisis sampah plastik HDPE
2. Mengetahui pengaruh laju pemanasan terhadap kinerja nanokatalis MnFe_2O_4 pada proses pirolisis sampah plastik HDPE

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberi manfaat sebagai berikut:

1. Menjadi tambahan sumber informasi berupa ilmu pengetahuan mengenai pengaruh penambahan katalis MnFe_2O_4 pada proses pirolisis sampah plastik HDPE.
2. Memberikan tambahan informasi terhadap masyarakat luas pada umumnya, dan industri pengolahan sumber energi terbarukan bahwa pirolisis merupakan salah satu metode pengolahan sampah plastik HDPE yang minim polusi dan juga mampu mengubah sampah plastik HDPE menjadi sumber energi.
3. Menjadi dasar desain dan kontrol operasi untuk industri yang akan mengolah sampah plastik HDPE menjadi sumber energi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Dalam penelitian ini, penulis mencantumkan beberapa penelitian terdahulu yang relevan dengan permasalahan yang akan diteliti. Penelitian terdahulu yang dimaksud adalah sebagai berikut:

1. Penelitian dengan judul “*Kinetic Study of High Density Polyethylene (HDPE) Pyrolysis*” yang dilakukan oleh Salem and Lettieri pada tahun 2010, yang mana proses pirolisis dilakukan secara isothermal pada tiga temperatur, yaitu temperatur 500°C, 550°C dan 600°C. Penelitian difokuskan pada produk hasil pirolisis (bukan fokus pada kinetika reaksi). Produk hasil pirolisis dalam penelitian ini berupa arang dengan jumlah minimal 0,1wt%, lilin antara 44,1% dan 65,8% dan gas antara 20,2% sampai 43,7%. Hasil ini meningkat secara proporsional sesuai dengan kondisi operasi. Energi aktivasi keseluruhan pada pirolisis HDPE dalam penelitian ini adalah sebesar 147,25 kJ/mol.
2. Penelitian yang berjudul “*Kinetic Studies of Co-Pyrolysis of Rubber Seed with High Density Polyethylene*” yang dilakukan oleh Chin et al. pada tahun 2014, yang mana proses pirolisis dilakukan pada kondisi non-isothermal pada rentang temperatur 300–1200 K dengan variasi *heating rate* 10K/min, 20K/min, 30K/min dan 50K/min dengan *flow rate* nitrogen 100ml/min. Energi aktivasi pirolisis HDPE pada penelitian ini sebesar 242,13kJ/mol – 278,14kJ/mol.
3. Review jurnal dengan judul “*A Review on Thermal and Catalytic Pyrolysis of Plastic Solid Waste*” oleh Salem et al. pada tahun 2017 yang mana, Garforth et al. (1998) meneliti pengaruh dari katalis zeolit seperti HUSY, HZSM-5 dan HMOR pada pirolisis HDPE dengan kandungan polimer 40%. Hasilnya, bahwa HZSM-5 lebih efektif daripada jenis katalis yang lain dengan residu yang ditinggalkan hanya sebesar 4,53wt%, sedangkan Seo et al. (2003) meneliti pengaruh HZSM-5 terhadap pirolisis HDPE dan didapatkan hasil minyak hanya sebesar 35wt%.
4. Penelitian yang berjudul “*Thermal Behaviour and Kinetics of Municipal Solid Waste During Pyrolysis and Combustion Process*” yang dilakukan oleh Liu et al. pada tahun 2016. Penambahan katalis ZnO, Fe₂O₃ CuO dan Al₂O₃ pada rentang temperatur 450K – 900K, *heating rate* 20K/min dan *flow rate* 100ml/min mencegah pembentukan struktur kimia stabil. Katalis tersebut juga melemahkan ikatan C-C atau C-H melalui

mekanisme transfer oksigen. Seluruh katalis mempercepat dekomposisi *biowaste*, karet dan komponen plastik, sehingga meningkatkan karakteristik pengapian dan pembakaran MSW. Nilai energi aktivasi dihitung menggunakan metode Coats and Redfern (proses pirolisisnya isothermal yaitu pada temperatur 450K – 900K).

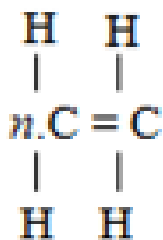
5. Penelitian dengan judul “*Effects of Additives on the Co-Pyrolysis of Municipal Solid Waste and Paper Sludge by Using Thermogravimetric Analysis*” yang dilakukan oleh Fang et al. pada tahun 2016, yang mana Proses pirolisis MSW dilakukan secara non-isothermal pada rentang temperatur 100°C sampai 900°C dengan variasi *heating rate* 10, 20 dan 30°C/min dan *flow rate* 90ml/min. Penambahan katalis sebesar 5% dari massa sampel, ukuran partikel MSW dan paper sludge adalah <178µm. Perhitungan energi aktivasi menggunakan metode Flynn-Wall Ozawa (FWO) dan hasil dari penambahan katalis (MgO, Al₂O₃ dan ZnO) mengurangi energi aktivasi dari proses pirolisis MSW.
6. Penelitian dengan judul “*Mechanistic Study of Mercury Adsorption and Oxidation by Oxygen Over Spinel-type MnFe₂O₄*” yang dilakukan oleh Yang et al. pada tahun 2017 yang mana, penambahan katalis MnFe₂O₄ mampu menyerap kadar air raksa dan mengoksidasi air raksa dari emisi pembangkit listrik batu bara, sehingga menjadi HgO yang dihasilkan bersifat tidak berbahaya.
7. Penelitian dengan judul “*Preparation of Nano-MnFe₂O₄ and Its Catalytic Performance of Thermal Decomposition of Ammonium Perchlorate*” oleh Aijun et al. (2011) menyatakan bahwa MnFe₂O₄ menunjukkan kinerja katalitik yang baik untuk dekomposisi termal ammonium perchlorate dan kinerja ini lebih baik daripada nano metal Ni, nano alloy NiB dan nano metal oxide Fe₂O₃.

2.2 Plastik HDPE (*High Density Polyethylene*)

HDPE (*High Density Polyethylene*) merupakan salah satu jenis plastik *polyethylene* yang memiliki rantai polimer panjang dengan sedikit cabang, sehingga memiliki sifat yang kuat. HDPE digunakan secara luas sebagai botol susu, botol oli, mainan, dll. Berbagai aplikasi HDPE ini berkontribusi sebesar 17,6% pada kategori sampah plastik dan merupakan jenis plastik terbesar urutan ke 3 pada sampah padat perkotaan (Sharuddin, et al., 2016).

Menurut Levine & Broadbelt (2009) “HDPE adalah komponen utama dari sampah polimer yang menyumbang sebesar 20,4%, tetapi hanya sebesar 9% saja dari jumlah ini

HDPE memiliki monomer C_2H_4 , dengan rumus struktur seperti Gambar 2.1 dan memiliki rantai polimer $(C_2H_4)_n$ dengan rumus struktur seperti pada Gambar 2.2.

[illegible]

Dimana, besarnya energi ikatan C–C adalah 347 kJ/mol dan besarnya energi ikatan C–H adalah 414 kJ/mol (Wardana, 2008).

Kata “nano” berkaitan dengan Nanoteknologi, yaitu sesuatu yang berkaitan dengan material dengan struktur kecil atau berukuran kecil. Satu nanometer sama dengan 10^{-9} m. Sebagian besar material dalam skala mikrometer menunjukkan sifat fisik yang sama seperti material ukuran besar (*bulk material*), tetapi material dalam skala nanometer menunjukkan sifat fisik yang sangat berbeda dengan dari *bulk*. Material skala nano ini menunjukkan sifat fisik yang luar biasa, dimana sebuah transisi dari atom atau molekul menjadi material berukuran besar (*bulk form*) terjadi di rentang skala ini. Sebagai contoh, kristal dalam skala nanometer memiliki titik leleh (*melting point*) yang rendah dan mengurangi konstanta lattice, karena jumlah atom-atom dan ion-ion di permukaan menjadi fraksi yang signifikan dari jumlah total atau ion-ion di permukaan dan energi permukaan memerankan peran penting pada stabilitas termal suatu material (Cao et al. 2004).

7

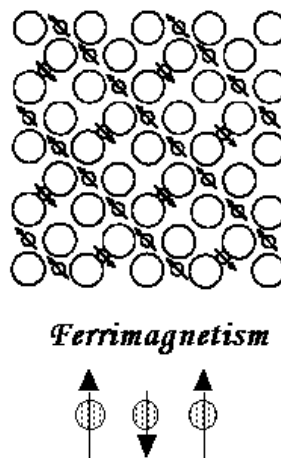
yang sangat besar, seluruh material dengan struktur nano memiliki energi permukaan yang sangat besar, sehingga dari segi termodinamika menjadi tidak stabil atau metastabil (Cao et al. 2004).

Katalis adalah sebuah zat yang bisa mempercepat reaksi kimia dengan cara membentuk ikatan dengan molekul yang bereaksi sampai membentuk produk, kemudian memisahkan diri di akhir reaksi menjadi seperti bentuk asal, dan siap digunakan untuk reaksi selanjutnya (Chorkendorff & Niemantsverdriet, 20017). Sehingga, nanokatalis berarti katalis yang berukuran nano (dalam skala nanometer).

Salah satu nanokatalis yang memiliki banyak kelebihan yaitu MnFe_2O_4 (*Manganese Ferrite Oxide*). MnFe_2O_4 adalah material komposit spinel dengan struktur lattice kubus dan *face centered*. Unsur logam transisi Mn dan Fe terletak pada celah tetrahedral dan oktahedral dan memiliki ikatan ionik yang kuat, gaya konduktivitas termal dan *thermal expansion* dengan intensitas yang sama antara ion logam dan ion oksigen. Karena struktur kristal alami inilah MnFe_2O_4 digunakan sebagai katalis (Aijun et al., 2011).

Katalis MnFe_2O_4 berfungsi efektif untuk menyerap merkuri dalam kontrol emisi di pembangkit listrik tenaga batu bara, karena memiliki kapasitas penyerapan yang tinggi dan memiliki sifat dapat diperbarui (Yang et al., 2017). Katalis MnFe_2O_4 juga menunjukkan performa katalitik yang baik untuk dekomposisi termal Ammonium Perchlorate, dimana kinerja katalitik ini lebih baik daripada nanometal Ni, nano alloy NiB dan nano metal oxide Fe_2O_3 (Aijun et al., 2011).

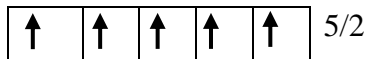
MnFe_2O_4 dibentuk dari sintesis MnO dan Fe_2O_3 , dimana MnO berbentuk tetrahedral dan Fe_2O_3 berbentuk oktahedral sehingga menghasilkan MnFe_2O_4 yang memiliki struktur kristal kubik spinel. MnFe_2O_4 bersifat ferrimagnetik karena tersusun dari dua sublattice yaitu Mn dan Fe dan dipisahkan oleh oksigen seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Susunan atom Mn, Fe dan O pada ferrimagnetik

Nomor atom Mn adalah 25, dimana dalam kondisi ion Mn^{2+} , atom Mn melepas 2 elektronnya, sehingga jumlah elektronnya tinggal 23, dan penulisan konfigurasi elektronnya seperti di bawah ini:

$\text{Mn}^{2+} : [18\text{Ar}] 3d^5$, dengan kondisi orbital d sebagai berikut:



Dari gambar di atas, dapat diketahui bahwa pada orbital d ion Mn^{2+} terdapat 5 elektron yang tidak berpasangan sehingga sangat berpotensi untuk menarik 5 elektron dari luar. Dengan kata lain, ion Mn^{2+} pada MnFe_2O_4 memiliki momen magnetik/medan magnet yaitu kekuatan untuk menarik elektron dari luar. Besarnya momen magnetik sebuah ion dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut:

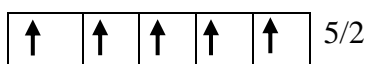
$$\mu_s = \sqrt{n(n+2)} \text{ BM} \quad (\text{Sugiyarto, 2003})$$

Dimana, μ_s adalah bilangan kuantum spin dan n adalah banyaknya elektron tak berpasangan. Sehingga, besarnya momen magnetik ion Mn^{2+} yaitu :

$$\begin{aligned} \mu_s \text{ Mn}^{2+} &= \sqrt{5(5+2)} \text{ BM} \\ &= \sqrt{5(7)} \text{ BM} \\ &= \sqrt{35} \text{ BM} \\ &= 5,92 \text{ BM} \end{aligned}$$

Nomor atom Fe adalah 26, dimana dalam kondisi ion Fe^{3+} , atom Fe melepas 3 elektronnya, sehingga jumlah elektronnya tinggal 23, dan konfigurasi elektronnya dapat dituliskan seperti dibawah ini:

$\mu \text{ Fe}^{3+} : [18\text{Ar}] 3d^5$, dengan kondisi orbital d sebagai berikut:



Dari gambar di atas dapat diketahui bahwa pada orbital d ion Fe^{3+} terdapat 5 elektron yang tidak berpasangan sehingga sangat berpotensi untuk menarik 5 elektron dari luar. Dengan kata lain, ion Fe^{3+} pada MnFe_2O_4 memiliki momen magnetik/medan magnet yaitu kekuatan untuk menarik elektron dari luar. Besarnya momen magnetik ion Fe^{3+} yaitu:

$$\begin{aligned} \mu_s \text{ Fe}^{3+} &= \sqrt{5(5+2)} \text{ BM} \\ &= \sqrt{5(7)} \text{ BM} \\ &= \sqrt{35} \text{ BM} \\ &= 5,92 \text{ BM} \end{aligned}$$

MnFe₂O₄ memiliki *energy band gap* sebesar 0,04 – 0,06 eV (Singh et al., 2008). Sehingga, dibutuhkan energi yang cukup rendah untuk menyebabkan elektron pada katalis MnFe₂O₄ untuk melompat.

2.4. Pirolisis

Pirolisis adalah proses termokimia yang terjadi pada kondisi tanpa oksigen yang menghasilkan produk berupa char, minyak dan gas (Liu et al., 2016). Dan berdasarkan literatur dari Jiao et al. (2009) “Pirolisis adalah kerusakan thermal material organik pada kondisi tanpa oksigen dan merupakan dasar dari hampir seluruh proses termokimia yang ada”. Pada dasarnya, pirolisis dan pembakaran keduanya merupakan proses termokimia, dimana kedua proses ini membutuhkan energi tertentu dari luar untuk menghasilkan produk melalui reaksi kimia, yaitu dengan menghasilkan atom-atom bermuatan yang aktif kemudian bereaksi dan membentuk molekul-molekul baru yang kuat.

2.5 Nitrogen

Nitrogen adalah gas yang tidak bereaksi dengan material lain pada temperatur dan tekanan normal. Pada proses pirolisis, nitrogen dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis untuk mencegah masuknya oksigen ke dalam reaktor. Sehingga, zat tidak stabil yang dihasilkan pada saat terjadi dekomposisi thermal pada plastik tidak berikatan dengan unsur oksigen, dan meminimalisir terjadinya proses pembakaran bahan baku plastik dengan oksigen.

Nitrogen merupakan unsur umum di alam semesta, dan merupakan unsur ke tujuh dari total kelimpahan di Bima Sakti dan Tata Surya. Di Bumi, unsur Nitrogen membantuk sekitar 78% dari atmosfer bumi dan dengan demikian, merupakan unsur bebas yang paling melimpah.

2.6 Kinetika Reaksi dan Energi Aktivasi

2.6.1 Kinetika Reaksi

Kinetika reaksi adalah cabang ilmu kimia yang mempelajari berlangsungnya suatu reaksi. Kinetika reaksi menerangkan dua hal yaitu mekanisme reaksi dan laju reaksi. Pentingnya mengetahui laju reaksi adalah untuk mengontrol reaksi kimia. Untuk dapat bereaksi, molekul pereaksi harus bertumbukan langsung dengan memperhatikan dua hal, yaitu harus pada posisi yang efektif dan cukup energi untuk berlangsungnya reaksi.

2.6.2 Parameter Kinetik

Salah satu parameter dari kinetika reaksi adalah energi aktivasi. Energi aktivasi adalah energi minimum yang dibutuhkan untuk memulai suatu reaksi kimia (Fang et al., 2016). Energi aktivasi dilambangkan dengan simbol E_a dengan satuan J/mol (Joule per mol). Semakin rendah energi aktivasi, maka semakin mudah pula sampel tersebut bereaksi (terbakar) (Mujiarto, 2012). Berdasarkan literatur dari Biagini et. al. (dalam Sukarni, 2014) menyatakan bahwa energi aktivasi proses dekomposisi biomassa dapat diperkirakan berdasarkan grafik termogravimetrik dengan metode isokonvensional. Metode ini digunakan untuk menggambarkan mekanisme yang kompleks dimana reaksi kimia berlangsung secara simultan dan mekanismenya tidak diketahui secara pasti. Kinetika non isothermal dapat diklasifikasikan menjadi dua model, yaitu model fitting (yang diidentifikasi dari model kinetika reaksi) dan model isokonvensional (*free model*) (Lopez et al., 2012).

Percobaan non isothermal dilakukan pada kondisi keseimbangan termal, dan sampel diukur sebagai fungsi temperatur. Tingkat degradasi atau konversi $\frac{d\alpha}{dt}$ merupakan fungsi linier dari temperatur konstan, yang nilainya tergantung pada $k(T)$ dan $f(\alpha)$. Hal ini dinyatakan sebagai berikut (Zheng-Jian, 2012):

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T) f(\alpha) \quad (2.2)$$

Dimana, α adalah tingkat konversi yang menunjukkan fraksi material yang terbakar, $k(T)$ adalah konstanta temperatur dan $f(\alpha)$ adalah model reaksi yang mendeskripsikan ketergantungan laju reaksi terhadap batas reaksi.

Deskripsi matematis dari data dekomposisi *single step solid-state* didefinisikan dengan *kinetic triplet* yaitu energi aktivasi (E), parameter Arrhenius (A) dan persamaan aljabar dari model kinetik sebagai fungsi konversi fraksional (α) yaitu $f(\alpha)$ yang hanya tergantung pada temperatur, maka:

$$k = Ae \left(-\frac{E}{RT} \right) \quad (2.3)$$

Dimana, Ae adalah faktor frekuensi, E adalah energi aktivasi dan R adalah konstanta gas (8,314 J/mol.K).

Fungsi dari $f(\alpha)$ dijelaskan pada persamaan berikut:

$$f(\alpha) = (1 - \alpha)^n \quad (2.4)$$

Dimana, n adalah urutan reaksi pada percobaan non isothermal.

Tingkat konversi pada suatu proses reaksi dapat dinyatakan pada persamaan berikut (Zheng-Jian, 2012):

$$\alpha = \frac{m_i - m_t}{m_i - m_\infty} \quad (2.5)$$

Dimana, m_i adalah massa awal sampel, m_t massa sampel pada waktu percobaan, m_∞ adalah massa sisa dari proses reaksi, α adalah tingkat konversi dari material yang terdekomposisi, dimana nilai α adalah konstan.

Dari persamaan 2.1 – 2.4 dapat diringkas menjadi satu persamaan berikut:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) (1-\alpha)^n \quad (2.6)$$

Pada saat yang sama,

$$\beta = \frac{dT}{dt} \quad (2.7)$$

Dimana, β adalah *heating rate*.

$$\frac{d\alpha}{(1-\alpha)^n} = \frac{A}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) dT \quad (2.8)$$

Integral dari persamaan 2.7 adalah sebagai berikut:

$$g(\alpha) = \int_0^\alpha \frac{d\alpha}{(1-\alpha)^n} = \frac{A}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) dT \quad (2.9)$$

$$T = T_0 + \beta t \quad (2.10)$$

Dimana, T_0 adalah temperature dimulainya reaksi.

Metode FWO (Flynn-Wall-Ozawa) merupakan salah satu metode isokonvensional. Metode ini hanya digunakan untuk reaksi satu tahap (*single step*). Metode ini menyatakan garis lurus pada laju pemanasan yang berbeda berdasarkan hubungan antara logaritma laju pemanasan $\ln\beta$ dan $1/T$.

$$\ln\beta = \ln\left[\frac{0.0048AE}{Rg_\alpha}\right] - 1.0516 \frac{E}{R} \frac{1}{T} \quad (2.11)$$

Karena α adalah konstanta, $\ln\beta$ vs $1/T$ diperoleh pada beberapa laju pemanasan, menghasilkan garis lurus yang kemiringannya memungkinkan untuk dapat digunakan dalam perhitungan energy aktivasi.

Metode Vyazovkin merupakan metode non-isothermal yang sering digunakan untuk mempelajari kinetika dekomposisi termal biomassa. Persamaan untuk menghitung energi aktivasi dengan metode vyazovkin sebagai berikut:

$$\ln\frac{\beta}{T^2} = \ln\left[\frac{RA}{Eg(\alpha)}\right] - \frac{E}{R} \frac{1}{T} \quad (2.12)$$

Untuk setiap nilai konversi (α), $\ln(\beta/T^2)$ di plot terhadap $1/T$ diperoleh sebuah garis lurus dengan slope $-E/R$. Dengan demikian, E diperoleh sebagai fungsi dari konversi.

BAB III

KERANGKA KONSEP PENELITIAN

3.1. Konsep Cara Kerja Katalis Berdasarkan Teori

Pada dasarnya pirolisis merupakan suatu reaksi kimia endotermis, karena proses lepasnya ikatan-ikatan kimia *bulk material* terjadi akibat pemberian energi tertentu dari luar, sehingga menjadi atom-atom bermuatan yang aktif, kemudian berikatan dengan atom lain membentuk produk. Ada banyak cara yang bisa dilakukan untuk melepas ikatan atom dalam molekul atau membuat molekul bermuatan, yaitu dengan pemanasan, dengan menggunakan katalis untuk merangsang elektron yang mengikat atom-atom dalam molekul, atau mengganggu elektron dengan medan magnet sehingga tidak lagi mengorbit pada inti atom (Wardana, 2008).

Mekanisme pirolisis polimer diketahui sebagai reaksi jaringan radikal bebas yang kompleks dan luas (Levine & Broadbelt, 2009). Pada proses pirolisis, suatu material (dalam hal ini sampah plastik HDPE) dipanaskan untuk menghasilkan produk baru berupa minyak, char atau tar. Dengan adanya pemanasan ini, pada awal proses akan terjadi pemutusan ikatan C-C pada rantai polimer HDPE. Hal ini karena energy ikatan C-C lebih rendah daripada C-H, sehingga saat terkena panas dalam waktu yang bersamaan, maka ikatan C-C akan putus terlebih dahulu. Reaksi terbantuinya radikal pada saat HDPE dipanaskan pada awal proses pirolisis diberikan pada Gambar 3.1.

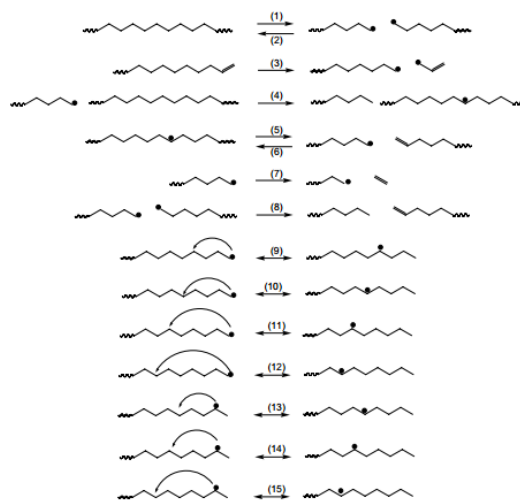


Fig. 2. Reaction pathways included in the mechanistic model for HDPE. (1) Bond fission, (2) radical recombination, (3) allyl bond fission, (4) hydrogen abstraction, (5) mid-chain β -scission, (6) radical addition, (7) end-chain β -scission, (8) disproportionation, (9) 1,4-hydrogen shift, (10) 1,5-hydrogen shift, (11) 1,6-hydrogen shift, (12) 1,7-hydrogen shift, (13) 1,8-hydrogen shift, (14) 1,9-hydrogen shift, and (15) 2,0-hydrogen shift.

Gambar 3.1 Proses terbentuknya radikal bebas pada saat HDPE dipanaskan pada proses pirolisis

Sumber : Levine & Broadbelt (2009)

Dalam penelitian ini, akan ditambahkan nanokatalis MnFe_2O_4 pada proses pirolisis sampah plastik HDPE. Hal ini diharapkan dapat mempercepat laju reaksi (laju pemutusan ikatan antar molekul HDPE), karena berdasarkan literatur dari Wardana (2008) “katalis dapat merangsang elektron dalam atom agar meninggalkan molekul, sehingga molekul tersebut menjadi pecah dan bermuatan”.

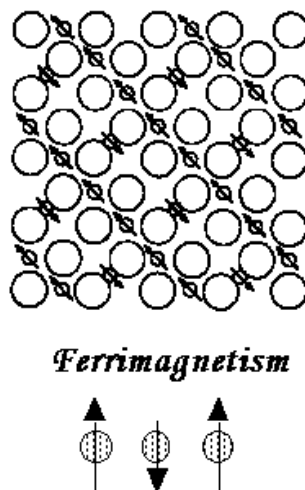
MnFe_2O_4 adalah material komposit spinel dengan struktur lattice kubus dan *face centered*. Unsur logam transisi Mn dan Fe terletak pada celah tetrahedral dan oktahedral dan memiliki ikatan ionik yang kuat, gaya konduktivitas termal dan thermal expansion dengan intensitas yang sama antara ion logam dan ion oksigen. Karena struktur kristal alami inilah MnFe_2O_4 digunakan sebagai katalis (Aijun et al., 2011).

Salah satu hal istimewa yang dimiliki oleh katalis, dalam hal ini katalis MnFe_2O_4 adalah momen magnetiknya, karena dengan adanya momen magnetik ini, katalis akan mengganggu kestabilan ikatan antar atom pada rantai polimer HDPE, sehingga ikatan antar atomnya lebih cepat putus dan menghasilkan radikal bebas. Radikal bebas ini akan mengganggu kestabilan ikatan yang lain sehingga lebih cepat terputus dan menghasilkan radikal lagi, begitu seterusnya. Sehingga, semakin banyak radikal yang terbentuk, maka akan lebih banyak ikatan antar atom yang cepat terputus, sehingga bisa mempercepat laju reaksi dan laju dekomposisi pirolisis HDPE juga memperkecil energi aktivasi.

Katalis MnFe_2O_4 disintesis dari MnO dan Fe_2O_3



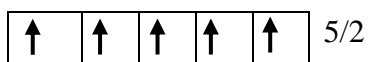
MnFe_2O_4 bersifat ferrimagnetik karena tersusun dari dua sublattice yaitu Mn dan Fe dan dipisahkan oleh oksigen seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Susunan atom Mn, Fe dan O pada ferrimagnetik

Atom Mn terletak pada celah tetrahedral (Aijun et al., 2011). Nomor atom Mn adalah 25, dimana dalam kondisi ion Mn^{2+} , atom Mn melepas 2 elektronnya, sehingga jumlah elektronnya tinggal 23, dan penulisan konfigurasi elektronnya seperti di bawah ini:

$\text{Mn}^{2+} : [18\text{Ar}] 3d^5$, dengan kondisi orbital d sebagai berikut:



Dari gambar di atas, dapat diketahui bahwa pada orbital d ion Mn^{2+} , terdapat 5 elektron yang tidak berpasangan, sehingga sangat berpotensi untuk menarik 5 elektron dari luar. Dengan kata lain, ion Mn^{2+} pada MnFe_2O_4 memiliki momen magnetik/medan magnet yaitu kekuatan untuk menarik elektron dari luar. Besarnya momen magnetik sebuah ion dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut:

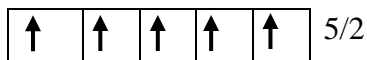
$$\mu_s = \sqrt{n(n+2)} \text{ BM} \quad (\text{Sugiyarto, 2003})$$

Dimana, μ_s adalah bilangan kuantum spin dan n adalah banyaknya elektron tak berpasangan. Sehingga, besarnya momen magnetik ion Mn^{2+} yaitu :

$$\begin{aligned} \mu_s \text{ Mn}^{2+} &= \sqrt{5(5+2)} \text{ BM} \\ &= \sqrt{5(7)} \text{ BM} \\ &= \sqrt{35} \text{ BM} \end{aligned}$$

Atom Fe terletak pada celah oktahedral (Aijun et al., 2011). Nomor atom Fe adalah 26, dimana dalam kondisi ion Fe^{3+} , atom Fe melepas 3 elektronnya, sehingga jumlah elektronnya tinggal 23, dan konfigurasi elektronnya dapat dituliskan seperti dibawah ini:

$\mu \text{ Fe}^{3+} : [18\text{Ar}] 3d^5$, dengan kondisi orbital d sebagai berikut:



Dari gambar di atas, dapat diketahui bahwa pada orbital d ion Fe^{3+} , terdapat 5 elektron yang tidak berpasangan, sehingga sangat berpotensi untuk menarik 5 elektron dari luar.

Besarnya momen magnetik ion Fe^{3+} yaitu:

$$\begin{aligned}\mu_s \text{ Fe}^{3+} &= \sqrt{5(5+2)} \text{ BM} \\ &= \sqrt{5(7)} \text{ BM} \\ &= \sqrt{35} \text{ BM} \\ &= 5,92 \text{ BM}\end{aligned}$$

Katalis MnFe_2O_4 memiliki dua buah ion Fe^{3+} , sehingga momen magnetik dari 2 buah ion Fe^{3+} adalah $2 \times 6,4 = 12,8$. MnFe_2O_4 memiliki *energy band gap* sebesar 0,04 – 0,06 eV (Singh et al., 2008).

Seperti yang sudah dipaparkan sebelumnya, pada orbital d ion Fe^{3+} memiliki 5 elektron tidak berpasangan. Elektron pada orbital memiliki bilangan kuantum spin (s), yang berarti bahwa elektron di dalam orbital itu tidak diam, melainkan terus berputar. Dan pada saat elektron-elektron pada ion Fe^{3+} (dalam katalis MnFe_2O_4) diberikan energi dari luar (dipanaskan, misal pada proses pirolisis), maka kemungkinan, gerakan putaran (spin) dari elektron-elektron tersebut lebih besar, sehingga menyebabkan medan magnetnya menjadi lebih luas.

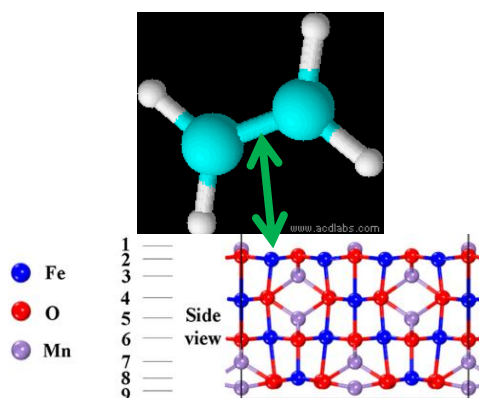
Jadi, disamping memiliki momen magnet yang cukup besar, sehingga memiliki kemampuan/gaya untuk menarik elektron dari luar, dengan adanya energi dari luar (misal : dipanaskan), elektron-elektron pada ion Fe^{3+} (dalam katalis MnFe_2O_4) menghasilkan gerakan putaran (spin) yang lebih besar, sehingga menyebabkan medan magnetnya menjadi lebih luas. Dan dari HDPE sendiri, pada saat dipanaskan, maka ikatan antar atomnya juga akan mengalami perenggangan, karena elektron-elektronnya yang juga semakin aktif bergerak.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa katalis MnFe_2O_4 dapat membantu mempercepat pemutusan ikatan pada molekul HDPE terutama pada ikatan antar atom C–C karena memiliki energi ikatan yang lebih rendah daripada C–H dan juga memperbanyak ikatan yang putus pada polimer HDPE. Cara kerja katalis MnFe_2O_4 terhadap molekul HDPE dapat diilustrasikan pada Gambar 3.3.

Jadi, mekanisme katalitik dari MnFe_2O_4 pada dekomposisi termal pirolisis sampah plastic HDPE terdiri dari dua aspek. Pertama, kedua logam transisi yaitu ion Mn^{2+} dan Fe^{3+} didalam

struktur MnFe_2O_4 memiliki orbital terluar d dengan konfigurasi elektron $3d^5$, dan orbital d ini tidak dipenuhi oleh elektron dan memiliki lubang konduktivitas yang sangat berguna untuk transfer elektron pada proses degradasi polimer HDPE.

Ke dua, dengan adanya area permukaan spesifik yang luas dan permukaan sisi aktif dalam jumlah yang besar pada partikel nano MnFe_2O_4 , ini mudah menyerap molekul dalam fasa gas pada reaksi redoks permukaannya, yang mendorong reaksi redoks diantara mereka. Hal ini seperti yang terjadi pada mekanisme katalitik pada dekomposisi termal ammonium perchlorate (Aijun et al., 2011).



Gambar 3.3 Ilustrasi reaksi antara molekul HDPE dengan katalis MnFe_2O_4

BAB IV

METODE PENELITIAN

4.1. Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan rancangan penelitian eksperimen eksploratif karena dalam penelitian ini dilakukan pengujian-pengujian terhadap sampel yaitu sampah plastik HDPE untuk mendapatkan data perilaku termal dan kinetika reaksi pada proses pirolisis sampah plastik HDPE, sehingga bisa diketahui komposisi fisik, komposisi kimia, dan nilai kalor sampah plastik HDPE serta energi aktivasi dari proses pirolisis sampah plastik HDPE.

4.2. Populasi dan Sampel

Populasi dalam penelitian ini adalah seluruh sampah plastik HDPE, sedangkan sampel dalam penelitian ini adalah salah satu jenis dari plastik HDPE yaitu botol oli. Masa sampel yang digunakan dalam uji proximate, SEM-EDX dan uji dekomposisi tanpa katalis adalah masing-masing 20mg. Untuk uji dekomposisi dengan katalis, massa sampel 20mg dan katalis 1mg. Ukuran katalis yang digunakan dalam penelitian ini adalah 60,093 nm. Massa sampel yang digunakan dalam uji nilai kalor adalah 50mg dalam setiap kali pengujian.

4.3. Instrumen Penelitian

4.3.1 Instrumen Pengumpulan Data

Instrumen pengumpulan data yang digunakan dalam penelitian ini dijelaskan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1

Instrumen Pengumpulan Data

No	Alat yang Digunakan	Uji	Tujuan	Tempat Pengujian
1	METTLER TOLEDO TGA/DCS1 <i>thermogravimetric simultaneous thermal analyzer</i>	Proksimat	Untuk mendapatkan data komposisi fisik sampah plastik HDPE yang meliputi <i>moisture</i> (M), <i>volatile matter</i> (VM), <i>fixed carbon</i> (FC) dan <i>ash</i> (A)	Laboratorium Energi ITS
2	SEM (<i>Scanning Electron Microscopy</i>) Merk FEI, Type : Inspect -S5, EDX Merk AMETEX	SEM-EDX (<i>Scanning Electron Microscope</i>) – (<i>Energy Dispersive X-Ray</i>)	Untuk mendapatkan data komposisi kimia (kandungan unsur kimia) sampah plastik HDPE dilihat struktur permukaannya	Laboratorium Material dan Mineral Maju, FMIPA, UM
3	<i>Bomb Calorimeter</i>	Uji nilai kalor	Untuk mendapatkan data nilai kalor (<i>HHV</i>) dari sampah plastik HDPE	Laboratorium Motor Bakar UB
4	METTLER TOLEDO TGA/DCS1 <i>thermogravimetric simultaneous thermal analyzer</i>	Uji termogravimetri sampah plastik HDPE tanpa katalis dengan <i>heating rate</i> 10, 15, 20, 25°C/min.	Untuk mendapatkan data pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE sehingga bisa dihitung energi aktivasinya	Laboratorium Energi ITS
5	METTLER TOLEDO TGA/DCS1 <i>thermogravimetric simultaneous thermal analyzer</i>	Uji termogravimetri sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 dengan <i>heating rate</i> 10, 15, 20, 25°C/min.	Untuk mendapatkan data pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 sehingga bisa dihitung energi aktivasinya, serta mengetahui pengaruh penambahan katalis terhadap proses pirolisis HDPE.	Laboratorium Energi ITS

4.4. Tahap-Tahap Pelaksanaan Penelitian

4.4.1 Tahap Persiapan Penelitian

Berikut ini kegiatan persiapan yang dilakukan penulis sebelum melaksanakan penelitian di laboratorium:

- 1) Pengumpulan sampel sampah plastik HDPE dan dipilih satu jenis sampah plastik HDPE yaitu botol oli.
- 2) Mencuci dan membersihkan sampel plastik HDPE. Sampel plastik HDPE yang sudah dikumpulkan kemudian dicuci dan dibersihkan untuk menghilangkan kotoran-kotoran yang menempel pada sampel, sehingga hasil yang didapat pada saat pengujian nanti bisa lebih akurat tanpa campuran bahan atau kotoran lain.

- 3) Mengeringkan sampel. Proses pengeringan sampel sampah plastik HDPE ini dilakukan secara manual dibawah sinar matahari, karena sampah plastik HDPE ini berupa sampah kering, sehingga proses pengeringan dengan menggunakan panas matahari sudah cukup untuk mengeringkannya.
- 4) Menghancurkan atau menghaluskan sampel. Setelah dikeringkan, sampel sampah plastik HDPE dihancurkan. Proses penghancuran atau penghalusan sampel sampah plastik HDPE pada penelitian ini dilakukan menggunakan mesin pamarut kelapa dan blender, sehingga didapat sampel berupa serbuk sampah plastik HDPE.
- 5) Penyaringan butiran sampel. Sampel sampah yang sudah berupa butiran-butiran tersebut disaring dan diambil ukuran partikel sampel sebesar 60mesh.

4.4.2 Tahap Pelaksanaan Penelitian

Dalam pelaksanaannya, untuk mendapatkan data sesuai dengan tujuan dan target penelitian, dilakukan eksperimen-eksperimen di beberapa laboratorium. Jenis dan target hasil dari masing-masing eksperimen dijelaskan sebagai berikut:

1) Uji Proksimat

Uji proksimat adalah eksperimen yang dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan data sifat fisik sampel yang meliputi kadar air (*moisture*, M), kadar volatil (*volatile matter*, VM), kandungan karbon tetap (*fixed carbon*, FC) dan kadar abu (*ash*, A). Uji proximate akan dilakukan di Laboratorium Energi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya dengan alat METTLER TOLEDO TGA/DCS1 *thermogravimetric simultaneous thermal analyzer*. Uji proximate dilakukan pada temperatur 25°C – 1000°C.

2) Uji SEM-EDX (*Scanning Electron Microscope – Energy Dispersive X-Ray*).

Uji SEM-EDX dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan data kandungan sifat kimia (kandungan unsur kimia) dalam sampah plastik HDPE. Komposisi kimia menentukan pembakaran biomassa dan karakteristik residu (Sukarni, 2014)

3) Uji Nilai Kalor

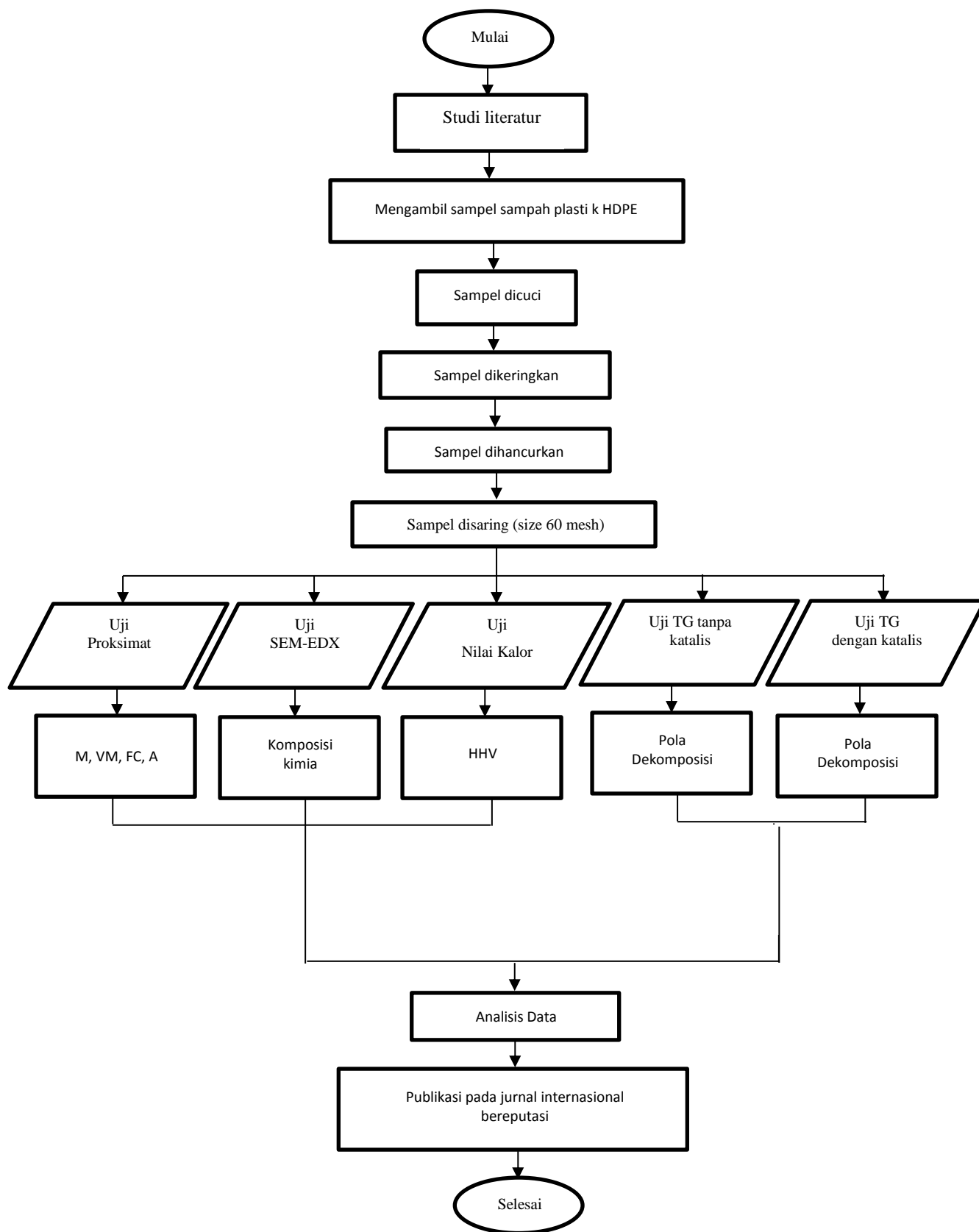
Uji nilai kalor dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan data nilai kalor (*Higher Heating Value, HHV*) sampah plastik HDPE. Uji nilai kalor dalam penelitian ini dilakukan di Laboratorium Motor Bakar, Universitas Brawijaya.

4) Uji Termogravimetri (TG)

Uji termogravimetri (TG) dilakukan untuk mengetahui pola dan laju dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE. Uji TG dilakukan menggunakan alat TGA (*Thermogravimetric Analyzer*) merk Mettler Toledo yang dilakukan di Laboratorium Energi Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Alat TGA ini dihubungkan langsung dengan komputer sehingga saat running eksperimen data hasil eksperimen akan langsung terekam dalam komputer dalam bentuk file txt. File txt ini kemudian di konvert ke excel, selanjutnya data excel ini di input ke software Origin Pro. 2017 32 bite untuk diplot menjadi grafik TG (*Termogravimetry*) dan DTG (*Derivatif Thermogravimetry*) yang masing-masing menunjukkan penyusutan massa dan laju penyusutan massa per satuan waktu. Sehingga dari kedua grafik tersebut dapat diketahui pola dan laju dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE.

Uji TG pada penelitian ini ada dua bagian, yaitu uji TG pirolisis sampah plastik HDPE tanpa katalis dan uji TG pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 . Masing-masing dari kedua pengujian ini dilakukan pada *range temperature* 25°C – 1000°C dengan variasi *heating rate* 10, 15, 20 dan $25^\circ\text{C}/\text{min}$ menggunakan nitrogen dengan *flow rate* 100ml/min. Dari hasil grafik kedua penelitian ini, nantinya bisa dihitung nilai energi aktivasinya. Nilai energi aktivasi dari masing-masing jenis pengujian akan dihitung dengan menggunakan metode Flynn Wall-Ozawa (FWO) dan Vyazovkin. Dari sini, akan diketahui perbandingan nilai energi aktivasi proses pirolisis sampah plastik HDPE tanpa dan dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 , sehingga dapat dibuktikan bahwa penambahan katalis MnFe_2O_4 dapat mempercepat laju reaksi pada proses pirolisis HDPE.

Tahap-tahap pelaksanaan penelitian ini dijelaskan pada Gambar 4.



Gambar 4.1 Tahap pelaksanaan penelitian

4.5 Teknik Analisis Data

Seluruh data yang diperoleh dari hasil pengujian di laboratorium selanjutnya akan diolah dan dianalisis untuk menjawab rumusan masalah dan hipotesis dari penelitian ini.

- a. Sifat fisik sampah plastik HDPE dianalisis dengan analisis proksimat
- b. Sifat kimia sampah plastik HDPE dianalisis dengan mendeskripsikan dan menghitung hasil uji EDX. Uji SEM-EDX dilakukan untuk mengetahui kandungan unsur kimia dalam sampah plastik HDPE.
- c. Nilai kalor sampah plastik HDPE dianalisis dari hasil uji nilai kalor dengan *Bomb Calorimeter*.
- d. Pola dekomposisi pada proses pirolisis HDPE dianalisis dengan menggunakan grafik termogravimetri/TG (yang menunjukkan besarnya penyusutan massa/*mass loss* terhadap temperatur) dan grafik derivatif termogravimetri /DTG (yang menunjukkan laju penyusutan massa/*mass loss rate*) kemudian dapat dihitung energi aktivasinya. Perhitungan energi aktivasi pada penelitian ini akan dianalisis dengan dua metode yaitu metode Flynn-Wall-Ozawa (FWO) dan Vyazovkin. Dari analisis ke dua grafik ini juga dapat diketahui pengaruh penambahan katalis MnFe_2O_4 terhadap penyusutan massa sampah plastik HDPE selama proses pirolisis.

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1. Deskripsi Data

Data dalam penelitian ini didapatkan dari hasil pengujian sampel sesuai dengan urutan pelaksanaan penelitian seperti yang telah dijelaskan sebelumnya pada Bab IV. Penelitian ini dimulai dengan mengambil sampel sampah plastik HDPE (botol oli), kemudian sampel dicuci, dikeringkan, dihancurkan dan disaring sehingga didapatkan ukuran sampel yang seragam yaitu 60mesh. Selanjutnya, serbuk sampah plastik HDPE tersebut diuji dengan beberapa pengujian seperti yang telah dijelaskan pada Bab IV, kemudian dianalisis dan keluarlah hasil.

Pengujian yang dilakukan pada sampel meliputi uji proksimat yang dilakukan di Laboratorium Energi dan Lingkungan LPPM Institut Teknologi Sepuluh Nopember, uji SEM-EDX dilakukan di Laboratorium Sentral Mineral dan Material Maju Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Malang, uji nilai kalor yang dilakukan di Laboratorium Motor Bakar Fakultas Teknik Universitas Brawijaya dan uji TG (*Thermogravimetri*) yang dilakukan di Laboratorium Energi dan Lingkungan LPPM Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Dari beberapa pengujian tersebut didapatkan data kandungan sifat fisik, sifat kimia, nilai kalor dan pola dekomposisi pirolisis dari sampah plastik HDPE tanpa penambahan katalis dan dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 . Selanjutnya dari data dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan dan tanpa katalis bisa didapatkan parameter kinetiknya dan dihitung energi aktivasinya dengan metode FWO dan Vyazovkin, kemudian bisa dianalisis mekanisme kerja katalis MnFe_2O_4 sehingga dapat mempercepat laju dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE.

5.2 Kandungan Sifat Fisik Sampah Plastik HDPE (*High Density Polyethylene*)

Sifat fisik sampah plastik HDPE sangat penting untuk diketahui, karena pengetahuan tentang sifat fisik sampah plastik HDPE merupakan salah satu parameter penting yang menjadi dasar pemanfaatan energi sampah plastik HDPE. Ini karena sifat fisik suatu material akan mempengaruhi karakteristik pembakaran material tersebut.

Data kandungan sifat fisik sampah plastik HDPE telah didapatkan dari hasil uji proksimat yang dilakukan di Laboratorium Energi dan Lingkungan, LPPM, Institut

Teknologi Sepuluh Nopember. Dari hasil uji proksimat ini, didapatkan data kadar air/kelembaban (*Moisture, M*), kadar volatil (*Volatil Matter, VM*), kandungan karbon tetap (*Fixed Carbon, FC*) dan kadar abu (*Ash, A*) dari sampah plastik HDPE. Hasil uji proksimat sampah plastik HDPE disajikan pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1.

Hasil Uji Proksimat Sampah Plastik HDPE

Hasil Uji Proksimat (adb)			
<i>Moisture (wt%)</i>	<i>Volatil Matter (wt%)</i>	<i>Fixed Carbon (wt%)</i>	<i>Ash (wt%)</i>
0,20	98,68	0,04	1,08

Perbandingan hasil uji proksimat sampah plastik HDPE dengan beberapa batubara lignit dari Wuchang, China ditunjukkan pada Tabel 5.2.

Tabel 5.2.

Perbandingan Hasil Analisis Proksimat (Sifat Fisik) Sampah Plastik HDPE dengan Batubara Lignit dari Wuchang, China

Material	Hasil Analisis Proksimat (adb)				Referensi
	<i>Moisture (wt%)</i>	<i>Volatile Matter (wt%)</i>	<i>Fixed Carbon (wt%)</i>	<i>Ash (wt%)</i>	
Sampah Plastik HDPE	0,20	98,68	0,04	1,08	<i>This study</i>
Batubara Lignit dari Wuchang, China	6,8	25,15	28,80	39,25	Guo et al. (2018)

Berdasarkan data dari Tabel 5.2 diketahui bahwa kadar air sampah plastik HDPE hanya sebesar 0,20wt%. Kadar ini lebih kecil dibandingkan dengan kadar air dari batubara lignit dari Wuchang, China yang sebesar 6,8 wt%, sehingga sampah plastik HDPE membutuhkan energi yang lebih sedikit untuk proses pengaupan air dan pemanasan uap air (Sukarni et al. 2014). Dengan demikian, bisa menghemat kebutuhan energi selama proses pembakaran, terutama pada awal proses. Hal ini juga berlaku untuk proses pirolisis. Karena kadar air sampah plastik HDPE sangat sedikit, sehingga bisa menghemat energi terutama pada awal proses pirolisis.

Kadar volatil sampel sampah plastik HDPE sebesar 98,68wt%. Nilai ini hampir 4X lipat dari kadar volatil batubara lignit dari Wuchang, China yang hanya 25,15 wt%. Sukarni et al. (2014) menyatakan bahwa volatil merupakan zat reaktif, sehingga kadar volatil yang tinggi pada sampah plastik HDPE menjadikan sampah plastik HDPE material yang sangat reaktif dan akan memberikan laju pembakaran yang tinggi selama fase devolatilisasi (Sukarni et al. 2014).

Kandungan karbon tetap sampah plastik HDPE sebesar 0,04wt%. Kandungan ini lebih kecil dibandingkan kandungan karbon tetap batubara lignit dari Wuchang, China yang sebesar 28,80wt%.

Kadar abu sampah plastik HDPE hanya sebesar 1,08wt%. Kadar ini jauh lebih kecil daripada kadar abu batubara lignit dari Wuchang, China yang sebesar 39,25wt%. Sukarni et al. (2014) menyatakan bahwa proses pembakaran abu akan membentuk lapisan yang mengelilingi permukaan arang yang akan menghambat difusi oksigen selama terjadinya proses pembakaran. Karena kadar abu pada sampah plastik HDPE ini sangat kecil, sehingga cenderung tidak menghambat proses pembakaran, yang artinya hal ini berdampak baik untuk pembakaran.

5.3 Kandungan Sifat Kimia Sampah Plastik HDPE

Kandungan sifat kimia (kandungan unsur kimia) sampah plastik HDPE telah diketahui dari hasil uji SEM-EDX yang dilakukan di Laboratorium Sentral Mineral dan Meterial Maju Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Malang. Kandungan sifat kimia sampah plastik HDPE ditunjukkan pada Tabel 5.3.

Tabel 5.3.

Kandungan Unsur Kimia Sampah Plastik HDPE

Kandungan Unsur Kimia (Wt%)	
C	91,04 ± 1.07
O	8,28 ± 0.99
Na	1,85

Berdasarkan Tabel 5.3 menunjukkan bahwa sampah plastik HDPE memiliki kandungan unsur C yang tinggi yaitu 91,04wt%, unsur O dan mineral Na yang rendah masing-masing 8,28wt% dan 1,85wt%. Kandungan unsur karbon yang tinggi mempengaruhi nilai kalor dan berfungsi sebagai generator panas utama untuk proses pembakaran (Sukarni et al. 2017). Oksigen yang terikat secara organik akan lepas akibat dari proses termal dan akan menjadi pasokan bagi sebagian dari keseluruhan oksigen yang diperlukan pada proses pembakaran (Sukarni et al. 2017). Kandungan oksigen ini tidak berpengaruh pada laju pirolisis (Sukarni et al. 2017).) karena pada proses pirolisis udara yang digunakan adalah nitrogen/argon.

Kandungan mineral Na pada suatu material menyebabkan kecenderungan terjadinya korosi (Van Loo & Koppejan, 2008). Tetapi berdasarkan data dari Tabel 5.3, diketahui bahwa kandungan mineral Na pada sampah plastik HDPE sangat kecil yaitu hanya

1,85wt% yang artinya jika sampah plastik HDPE digunakan sebagai bahan bakar maka kecenderungan untuk menyebabkan korosi sangat kecil.

5.4. Nilai Kalor Sampah Plastik HDPE

Nilai kalor sampah plastik HDPE telah diketahui dari hasil uji nilai kalor yang dilakukan di Laboratorium Motor Bakar Fakultas Teknik Universitas Brawijaya. Pengujian ini dilakukan tiga kali pengulangan dan hasil uji nilai kalor ini ditunjukkan pada Tabel 5.4.

Tabel 5.4.

Hasil Uji Nilai Kalor Sampah Plastik HDPE

No	Pengujian ke	Nilai Kalor	
		calori/gram	MJ/kg
1	1	10.067.025	42.148,602
2	2	10.115.101	42.349,8865
3	3	10.212.350	42.757,0485
Rata-rata		10.131.492	42.418,51233

Berdasarkan data dari Tabel 5.4 diketahui bahwa nilai kalor sampah plastik HDPE sebesar 10131,49 cal/gram atau sama dengan 42,42 MJ/kg. Perbandingan nilai kalor sampah plastik HDPE dengan beberapa material lain ditunjukkan pada Tabel 5.5.

Tabel 5.5.

Perbandingan Nilai Kalor Sampah Plastik HDPE dengan Beberapa Material Lain

Material	Nilai Kalor (MJ/kg)	Referensi
Sampah plastik HDPE	42,418	<i>This study</i>
Batubara antrasit jenis semiantrasit	34,75	Billah (2010)
Batubara antrasit jenis antrasit	33,49	Billah (2010)
Batubara antrasit jenis meta-antrasit	32,41	Billah (2010)
Tempurung kelapa	18,83	Vankatesh et al. (2016)
Bagasse tebu	17,85	Vankatesh et al (2016)

Berdasarkan Tabel 5.5 diketahui bahwa nilai kalor sampah plastik HDPE jauh lebih besar daripada nilai kalor bagasse tebu dan tempurung kelapa yang masing-masing hanya 17,85 dan 18,83MJ/kg (Vankatesh et al. 2016). Bahkan lebih tinggi dari nilai kalor batu bara *high rank* yaitu batubara antrasit jenis meta-antrasit, batu bara antrasit jenis antrasit dan batubara antrasit jenis semi antrasit yang masing-masing nilai kalornya hanya sebesar 32,41, 33,49 dan 34,75MJ/kg (Billah, 2010).

5.5 Dekomposisi Termal Pirolisis Sampah Plastik HDPE Tanpa dan Dengan Penambahan Nanokatalis MnFe_2O_4

Data pola dekomposisi termal dari sampah plastik HDPE tanpa penambahan nanokatalis dan dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 telah didapatkan dari hasil uji termogravimetri (TG) yang dilakukan di Laboratorium Energi dan Lingkungan LPPM Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Dari hasil uji termogravimetri ini kemudian di analisis menggunakan *software* origin Pro. 2017 32-bit, sehingga didapatkan beberapa grafik yang menunjukkan pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE tanpa penambahan nanokatalis dan dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 . Grafik-grafik tersebut terdiri dari kurva TG (*Thermogravimetric*) yang menyatakan besarnya penurunan massa terhadap temperatur dan kurva DTG (*Derivatif Thermogravimetric*) yang menunjukkan laju penurunan massa terhadap temperatur.

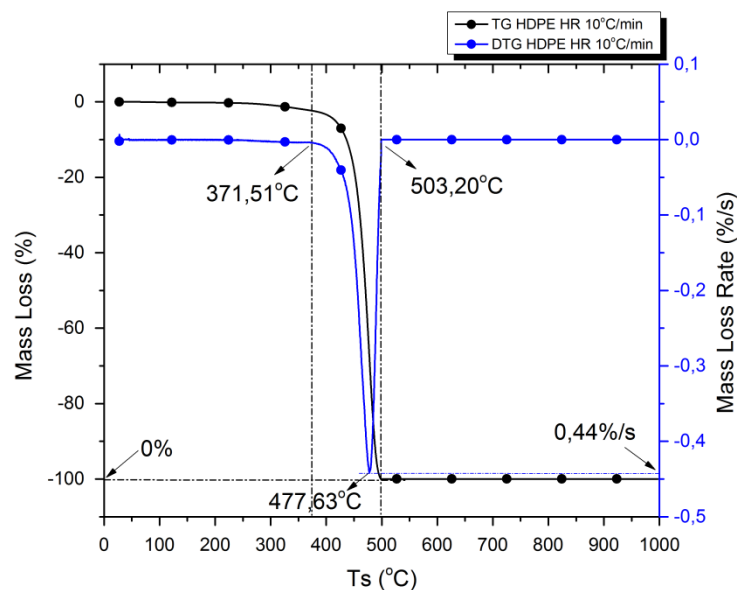
Uji termogravimetri ini dilakukan pada sampel sampah plastik HDPE tanpa penambahan nanokatalis dan dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 , dimana masing-masing pengujian dilakukan sebanyak empat kali dengan variasi *heating rate* 10, 15, 20 dan 25 °C/menit.

5.5.1 Hasil Uji Termogravimetri Sampah Plastik HDPE

Uji termogravimetri sampah plastik HDPE tanpa penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 dilakukan sebanyak empat kali dengan masing-masing menggunakan *heating rate* 10, 15, 20 dan 25 °C/menit.

5.5.1.1 Hasil Uji Termogravimetri Sampah Plastik HDPE Dengan *Heating Rate* 10°C/menit

Pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan *heating rate* 10°C/menit telah diketahui dari hasil uji termogravimetri seperti ditunjukkan pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1 Pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan *heating rate* 10°C/menit

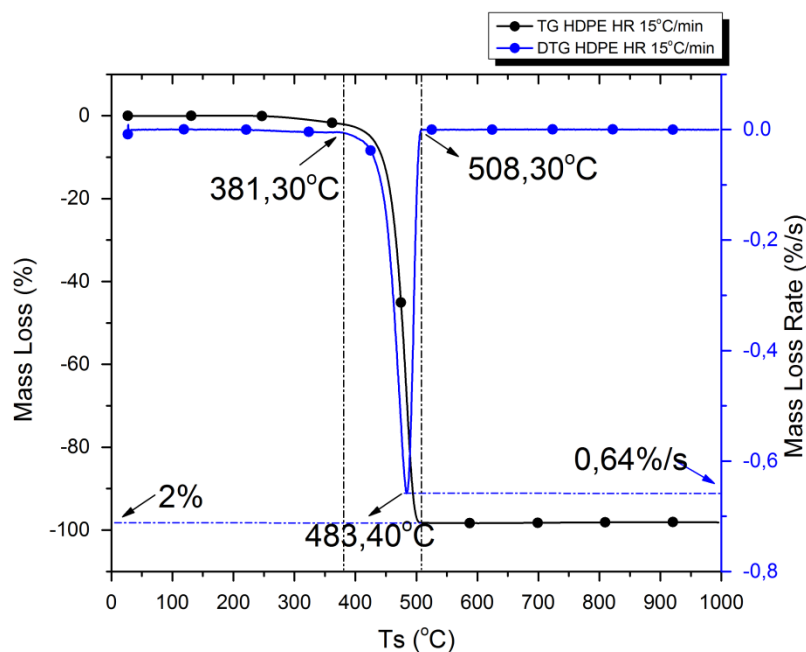
Berdasarkan Gambar 5.1 diketahui bahwa degradasi termal utama sampah plastik HDPE dengan *heating rate* 10°C/menit terjadi pada rentang temperatur 371,51°C – 508,20°C ditandai dengan adanya penyusutan masa yang sangat signifikan pada grafik TG. Hal ini berkaitan dengan degradasi komponen utama polimer yaitu rantai hidrokarbon yang terlepas dan menjadi volatil. Hal ini serupa dengan hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Sorum et al. (2001) yang menyatakan bahwa degradasi termal HDPE terjadi pada 350-500°C yang berkaitan dengan degradasi hidrokarbon.

Di bawah temperatur 371,51°C adalah terjadinya penguapan air dan pemutusan awal ikatan antar molekul polimer HDPE yang menghasilkan radikal. Kemudian mulai pada temperatur 371,51°C terjadi pemutusan ikatan antar molekul polimer HDPE dalam jumlah yang sangat besar akibat peningkatan temperatur dan juga dibantu oleh radikal yang dihasilkan dari pemutusan ikatan antar molekul HDPE itu sendiri hingga berakhir pada temperatur 508,20°C yang ditandai dengan kembalinya garis massa konstan. Laju penyusutan massa maksimum terjadi pada temperatur 477,63°C yaitu sebesar 0,44%/s.

Dari data hasil uji TG pirolisis sampah plastik HDPE pada *heating rate* 10°C/menit diketahui bahwa massa yang tersisa setelah akhir proses dekomposisi adalah sebesar 0 mg yang artinya tidak ada residu pada proses pirolisis sampah plastik HDPE pada *heating rate* 10°C/menit.

5.5.1.2 Hasil Uji Termogravimetri Sampah Plastik HDPE Dengan *Heating Rate* 15°C/menit

Pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan *heating rate* 15°C/menit telah diketahui dari hasil uji termogravimetri seperti ditunjukkan pada Gambar 5.2.



Gambar 5.2 Pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan *heating rate* 15°C/menit

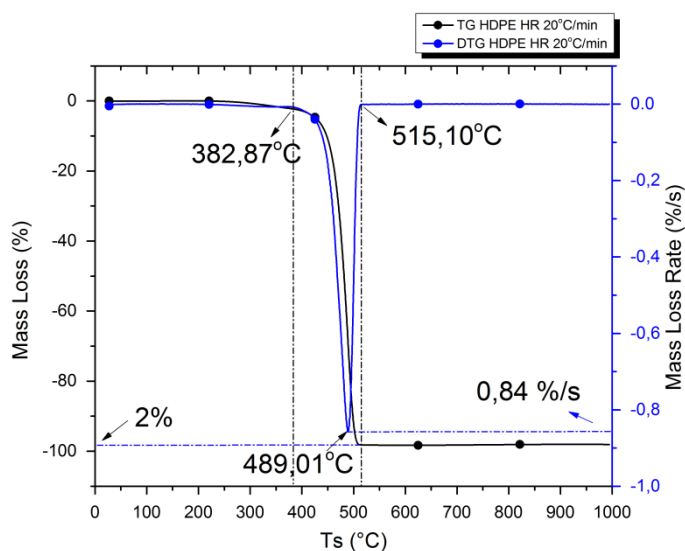
Berdasarkan Gambar 5.2 diketahui bahwa degradasi termal utama sampah plastik HDPE terjadi pada rentang temperatur 381,30 – 508,30°C ditandai dengan adanya penyusutan masa yang sangat signifikan pada grafik TG. Hal ini berkaitan dengan degradasi komponen utama polimer yaitu rantai hidrokarbon yang terlepas dan menjadi volatil. Hal ini serupa dengan hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Sorum et al. (2001) yang menyatakan bahwa degradasi termal HDPE terjadi pada 350-500 °C yang berkaitan dengan degradasi hidrokarbon.

Dibawah temperatur 381,30°C adalah terjadinya penguapan air dan pemutusan awal ikatan antar molekul polimer HDPE yang menghasilkan radikal. Kemudian mulai pada temperatur 381,30°C terjadi pemutusan ikatan antar molekul polimer HDPE dalam jumlah yang sangat besar akibat peningkatan temperatur dan juga dibantu oleh radikal yang dihasilkan dari pemutusan ikatan antar molekul HDPE itu sendiri hingga berakhir pada temperatur 508,30°C yang ditandai dengan kembalinya garis massa konstan. Laju penyusutan massa maksimum terjadi pada temperatur 483,40 °C yaitu sebesar 0,64%/s.

Dari data hasil uji TG pirolisis sampah plastik HDPE pada *heating rate* 15°C diketahui bahwa massa yang tersisa setelah akhir proses dekomposisi adalah sebesar 0,13mg yang ini artinya residu yang tersisa ini mendekati 2% dari massa sampel awal yaitu 7,17mg. Residu ini kemungkinan berasal dari sampel yang tidak terbakar, *fixed carbon* yang tersisa setelah proses pirolisis dan membentuk arang, kandungan mineral Na yang tidak bereaksi dengan unsur lain selama proses pirolisis sehingga tersisa menjadi residu dan juga dari kadar abu yang terkandung pada sampel.

5.5.1.3 Hasil Uji Termogravimetri Sampah Plastik HDPE Dengan *Heating Rate* 20°C/menit

Pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan *heating rate* 20°C/menit telah diketahui dari hasil uji termogravimetri seperti ditunjukkan pada Gambar 5.3.



Gambar 5.3 Pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan *heating rate* 20°C/menit

Berdasarkan Gambar 5.3 diketahui bahwa degradasi termal utama sampah plastik HDPE terjadi pada rentang temperatur 382,87 – 515,10°C ditandai dengan adanya penyusutan massa yang sangat signifikan pada grafik TG. Hal ini berkaitan dengan degradasi komponen utama polimer yaitu rantai hidrokarbon yang terlepas dan menjadi volatil. Hal ini serupa dengan hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Sorum et al. (2001) yang menyatakan bahwa degradasi termal HDPE terjadi pada 350-500 °C yang berkaitan dengan degradasi hidrokarbon.

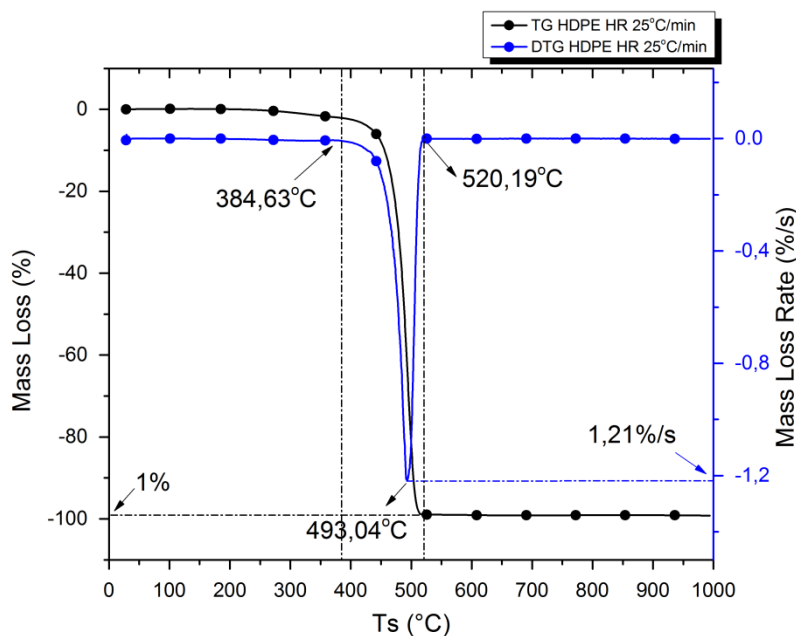
Dibawah temperatur 382,87°C adalah terjadinya penguapan air dan pemutusan awal ikatan antar molekul polimer HDPE yang menghasilkan radikal. Kemudian mulai pada

temperatur $382,87^{\circ}\text{C}$ terjadi pemutusan ikatan antar molekul polimer HDPE dalam jumlah yang sangat besar akibat peningkatan temperatur dan juga dibantu oleh radikal yang dihasilkan dari pemutusan ikatan antar molekul HDPE itu sendiri hingga berakhir pada temperatur $515,10^{\circ}\text{C}$ yang ditandai dengan kembalinya garis massa konstan. Laju penyusutan massa maksimum terjadi pada temperatur $489,01^{\circ}\text{C}$ yaitu sebesar $0,84\%/s$.

Dari data hasil uji TG pirolisis sampah plastik HDPE pada *heating rate* $20^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ diketahui bahwa massa yang tersisa setelah akhir proses dekomposisi adalah sebesar $0,15\text{mg}$ yang artinya residu yang tersisa mendekati 2% dari massa sampel awal yaitu $8,16\text{mg}$. Residu ini kemungkinan berasal dari sampel yang tidak terbakar, *fixed carbon* yang tersisa setelah proses pirolisis dan membentuk arang, kandungan mineral Na yang tidak bereaksi dengan unsur lain selama proses pirolisis sehingga tersisa menjadi residu dan juga dari kadar abu yang terkandung pada sampel.

5.5.1.4 Hasil Uji Termogravimetri Sampah Plastik HDPE Dengan Heating Rate $25^{\circ}\text{C}/\text{menit}$

Pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan *heating rate* $25^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ telah diketahui dari hasil uji termogravimetri seperti ditunjukkan pada Gambar 5.4.



Gambar 5.4 Pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan *heating rate* $25^{\circ}\text{C}/\text{menit}$

Berdasarkan Gambar 5.4 diketahui bahwa degradasi termal utama pirolisis sampah plastik HDPE dengan *heating rate* $25^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ terjadi pada rentang temperatur $384,63 -$

520,19°C ditandai dengan adanya penyusutan massa yang sangat signifikan pada grafik TG. Hal ini berkaitan dengan degradasi komponen utama polimer yaitu rantai hidrokarbon yang terlepas dan menjadi volatil. Hal ini serupa dengan hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Sorum et al. (2001) yang menyatakan bahwa degradasi termal HDPE terjadi pada 350-500 °C yang berkaitan dengan degradasi hidrokarbon.

Dibawah temperatur 384,63°C adalah terjadinya penguapan air dan pemutusan awal ikatan antar molekul polimer HDPE yang menghasilkan radikal. Kemudian mulai pada temperatur 384,63°C terjadi pemutusan ikatan antar molekul polimer HDPE dalam jumlah yang sangat besar akibat peningkatan temperatur dan juga dibantu oleh radikal yang dihasilkan dari pemutusan ikatan antar molekul HDPE itu sendiri hingga berakhir pada temperatur 520,19°C yang ditandai dengan kembalinya garis massa konstan. Laju penyusutan massa maksimum terjadi pada temperatur 493,04°C yaitu sebesar 1,22%/s.

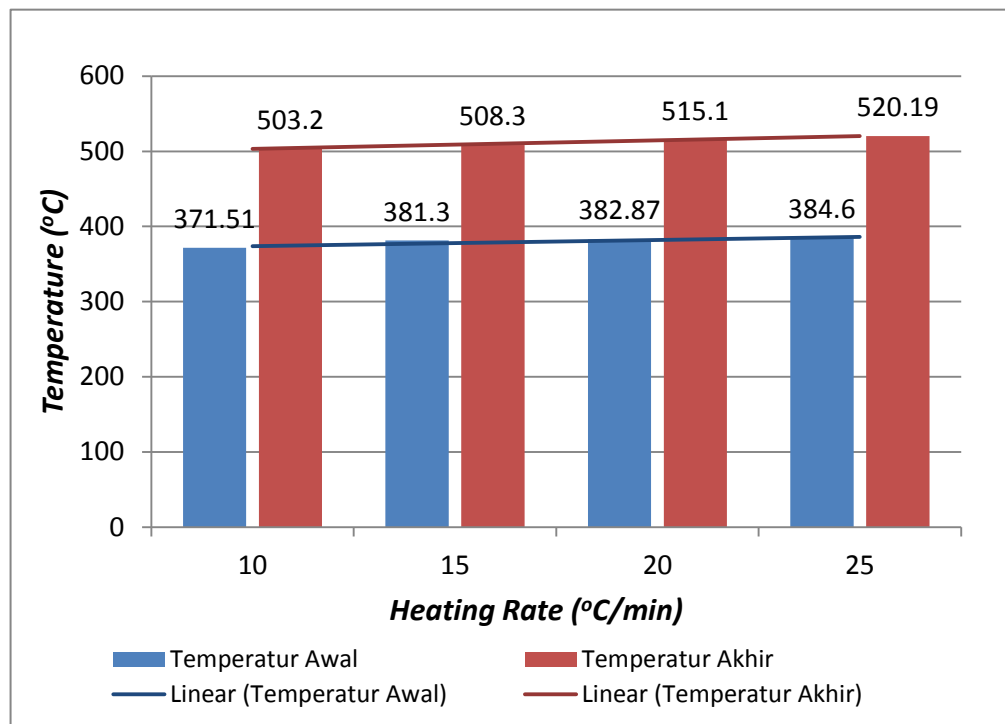
Dari data hasil uji TG pirolisis sampah plastik HDPE pada *heating rate* 25°C/menit diketahui bahwa massa yang tersisa setelah akhir proses dekomposisi adalah sebesar 0,08mg yang artinya residu yang tersisa mendekati 1% dari massa sampel awal yaitu 7,78mg. Residu ini kemungkinan berasal dari sampel yang tidak terbakar, *fixed carbon* yang tersisa setelah proses pirolisis dan membentuk arang, kandungan mineral Na yang tidak bereaksi dengan unsur lain selama proses pirolisis sehingga tersisa menjadi residu dan juga dari kadar abu yang terkandung pada sampel.

Dari pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE pada berbagai variasi *heating rate* yaitu 10,15,20 dan 25°C/min terjadi pergeseran temperatur awal dan akhir tahap dekomposisi yang ditampilkan pada Tabel 5.6 dan Gambar 5.5.

Tabel 5.6

Pergeseran Temperatur Awal Dan Akhir Dekomposisi Sampah Plastik HDPE

Temperatur awal dan akhir tahap dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE			
No	Heating Rate (°C/min)	T awal (°C)	T akhir (°C)
1	10	371,51	503,30
2	15	381,30	509,37
3	20	382,87	515,10
4	25	384,63	520,19



Gambar 5.5 Pergeseran temperatur awal dan akhir tahap dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE pada variasi *heating rate*

Dari Tabel 5.6 dan Gambar 5.5 diketahui bahwa seiring dengan peningkatan *heating rate* menyebabkan peningkatan temperatur awal dan akhir tahap dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE. Semakin tinggi *heating rate* menyebabkan pergeseran temperatur awal dan akhir tahap dekomposisi ke temperatur yang lebih tinggi. Hal ini terjadi karena pada proses pirolisis dengan *heating rate* yang lebih tinggi maka tidak cukup waktu untuk perpindahan panas dari permukaan sampel ke bagian dalam sampel sehingga temperatur bagian sampel lebih rendah daripada temperatur permukaan sampel. Hal ini memungkinkan panas di bagian dalam sampel belum cukup untuk memutuskan ikatan antar molekul sampel sehingga pemutusan ikatan antar molekul sampel tertunda ke temperatur yang lebih tinggi. Selain itu, jika perbedaan temperatur antara permukaan dengan bagian dalam sampel terlalu besar bisa mengakibatkan bagian permukaan sampel mengalami hangus terlebih dulu dan menghasilkan kerak. Dan jika kerak yang dihasilkan tersebut memiliki konduktivitas termal yang rendah maka juga akan menghambat difusi panas dari permukaan ke bagian dalam sampel. Akibatnya panas dibagian dalam sampel belum cukup untuk memutuskan ikatan antar molekul sehingga proses awal dekomposisi terjadi pada temperatur yang lebih tinggi.

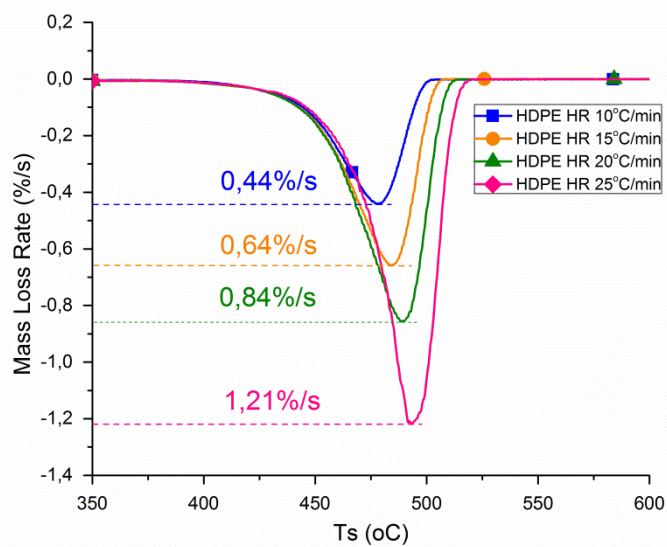
Disisi lain, peningkatan *heating rate* mulai 10, 15, 20 dan 25°C/min menguntungkan pada laju penyusutan massa proses pirolisis sampah plastik HDPE karena laju penyusutan

massa maksimal meningkat seiring dengan peningkatan *heating rate* seperti ditunjukkan pada Tabel 5.7 dan Gambar 5.6.

Tabel 5.7

Laju Penyusutan Massa Maksimum Pirolisis Sampah Plastik HDPE Pada Berbagai Heating Rate

Laju penyusutan massa maksimum pirolisis sampah plastik HDPE		
No	Heating Rate (°C/min)	Laju penyusutan massa maksimum (%/s)
1	10	0,44
2	15	0,64
3	20	0,84
4	25	1,21



Gambar 5.6 Laju penyusutan massa maksimum proses pirolisis sampah plastik HDPE pada variasi *heating rate*

Dari Tabel 5.7 dan Gambar 5.6 diketahui bahwa laju penyusutan massa maksimum proses pirolisis sampah plastik HDPE meningkat seiring dengan peningkatan *heating rate*, dimana laju penyusutan massa tertinggi terjadi pada *heating rate* 25°C/min yaitu sebesar 1,21%/s. Hal ini terjadi karena pada *heating rate* yang tinggi maka penambahan temperatur pada sampel/perubahan temperatur sampel terjadi lebih cepat yang menyebabkan gerakan atom-atom penyusun molekul sampel HDPE (baik gerakan vibrasi maupun translasi) menjadi lebih cepat. Yahya et al. (2013) juga menyatakan bahwa peningkatan temperatur menyebabkan peningkatan vibrasi termal atom. Hal ini menyebabkan ikatan antar molekul sampel menjadi semakin tidak stabil, dimana ikatan antar molekulnya semakin merenggang dan semakin melemah sehingga lebih cepat terputus.

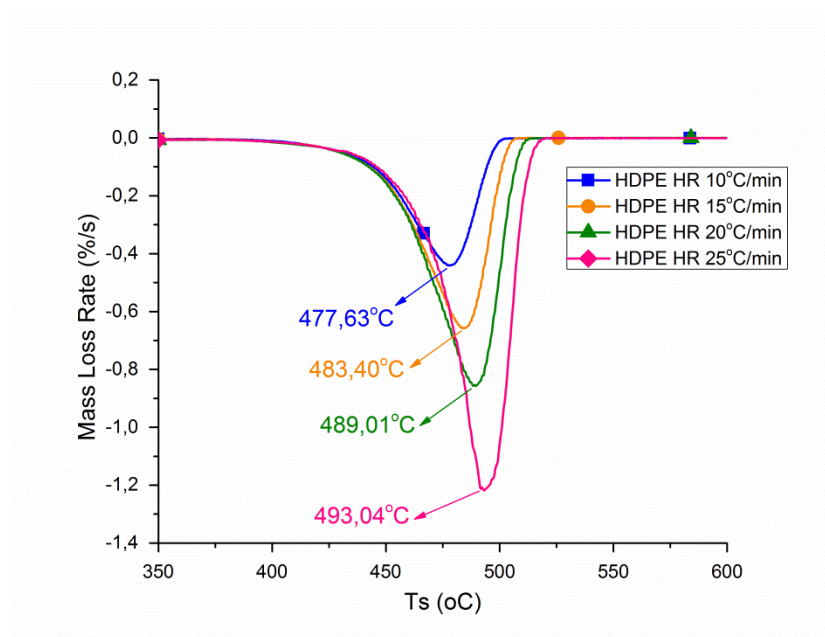
Peningkatan *heating rate* mulai 10, 15, 20 dan 25°C/min juga menyebabkan pergeseran temperatur puncak dekomposisi pirolisis ke temperatur yang lebih tinggi.

Istilah puncak dekomposisi disini yaitu titik dimana terjadi laju penyusutan maksimum. Pergeseran temperatur puncak dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE ditampilkan pada Tabel 5.8 dan Gambar 5.7.

Tabel 5.8

Pergeseran Temperatur Puncak Tahap Dekomposisi Pirolisis Sampah Plastik HDPE Pada Variasi Heating Rate

Pergeseran Temperatur Puncak Dekomposisi Pirolisis Sampah Plastik HDPE pada Variasi Heating Rate		
No	Heating Rate (°C/min)	T puncak dekomposisi (°C)
1	10	477,63
2	15	483,40
3	20	489,01
4	25	493,04



Gambar 5.7 Pergeseran temperatur puncak tahap dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE pada variasi *heating rate*

Dari Tabel 5.8 dan Gambar 5.7 diketahui bahwa seiring peningkatan *heating rate* maka terjadi pergeseran temperatur puncak dekomposisi, dimana temperatur puncak dekomposisi bergeser ke temperatur yang lebih tinggi. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa seiring dengan peningkatan *heating rate* menyebabkan peningkatan temperatur awal dekomposisi. Peningkatan temperatur awal dekomposisi secara otomatis juga meningkatkan temperatur puncak dekomposisi ke temperatur yang lebih tinggi. Namun demikian, meskipun temperatur puncak dekomposisi bergeser ke temperatur yang lebih tinggi, laju penyusutan massa maksimum pada proses pirolisis sampah plastik HDPE meningkat seiring dengan peningkatan *heating rate* seperti yang telah dijelaskan pada Gambar 5.6.

Peningkatan *heating rate* mulai 10, 15, 20 dan 25°C/min juga berpengaruh pada residu yang tersisa di akhir proses pirolisis sampah plastik HDPE. Residu yang tersisa dari proses pirolisis sampah plastik HDPE pada variasi *heating rate* seperti dijelaskan pada Tabel 5.9.

Tabel 5.9

Residu Pada Proses Pirolisis Sampah plastik HDPE Pada Variasi Heating Rate

Residu Pada Proses Pirolisis Sampah Plastik HDPE Pada Variasi Heating Rate				
HDPE				
No	HR	Massa Awal (mg)	Massa Residu (mg)	Residu (%)
1	10	10,20	0	0
2	15	7,17	0,13	2
3	20	8,16	0,15	2
4	25	7,78	0,08	1

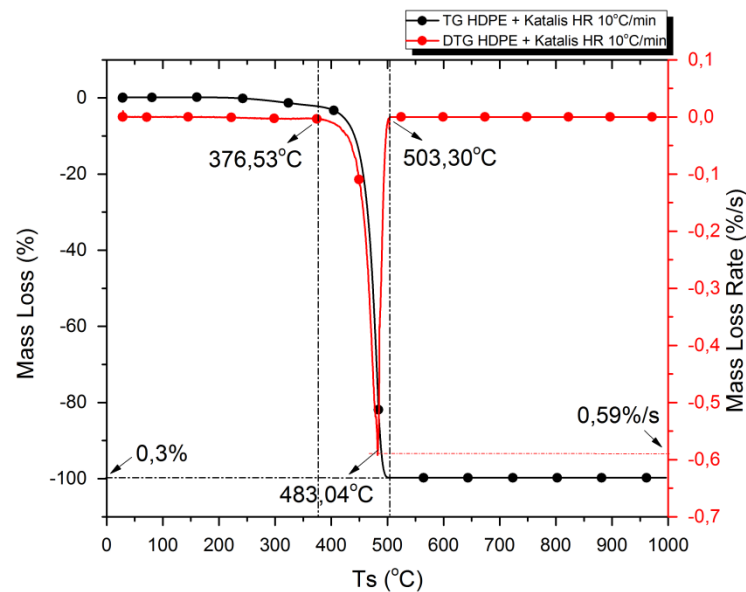
Dari Tabel 5.9 diketahui bahwa residu yang tersisa pada proses pirolisis sampah plastik HDPE sangat sedikit. Residu ini kemungkinan berasal dari sampel yang tidak terbakar, *fixed carbon* yang tersisa setelah proses pirolisis dan membentuk arang, kandungan mineral Na yang tidak bereaksi dengan unsur lain selama proses pirolisis sehingga tersisa menjadi residu dan juga dari kadar abu yang terkandung pada sampel. Karena residu yang dihasilkan pada proses pirolisis sampah plastik HDPE ini sangat sedikit sehingga untuk penanganan residunya bisa lebih hemat dan mudah.

5.5.2 Hasil Uji Termogravimetri Sampah Plastik HDPE Dengan Penambahan Nanokatalis MnFe_2O_4

Uji termogravimetri sampah plastik HDPE dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 dilakukan sebanyak empat kali dengan masing-masing menggunakan *heating rate* 10, 15, 20 dan 25 °C/menit.

5.5.2.1 Hasil Uji Termogravimetri Sampah Plastik HDPE Dengan Penambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 Pada *Heating Rate* 10°C/menit

Pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan penambahan nanokatalis pada MnFe_2O_4 *heating rate* 10°C/menit telah diketahui dari hasil uji termogravimetri seperti ditunjukkan pada Gambar 5.8.



Gambar 5.8 Pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada *heating rate* $10^\circ\text{C}/\text{menit}$

Berdasarkan Gambar 5.8 diketahui bahwa degradasi termal utama pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada *heating rate* $10^\circ\text{C}/\text{menit}$ terjadi pada rentang temperatur $376,53 - 503,30^\circ\text{C}$ ditandai dengan adanya penyusutan massa yang sangat signifikan pada grafik TG. Hal ini berkaitan dengan degradasi komponen utama polimer yaitu rantai hidrokarbon yang terlepas dan menjadi volatil. Hal ini serupa dengan hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Sorum et al. (2001) yang menyatakan bahwa degradasi termal HDPE terjadi pada $350-500^\circ\text{C}$ yang berkaitan dengan degradasi hidrokarbon.

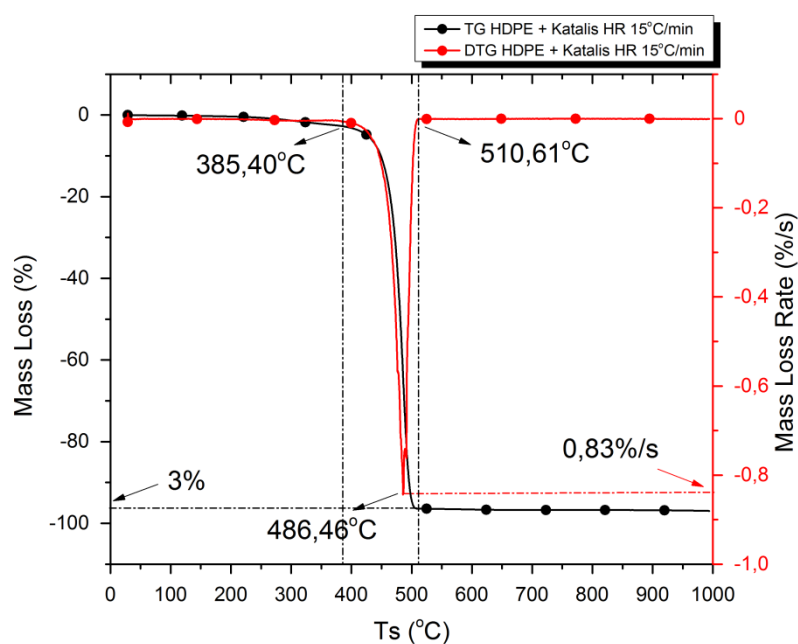
Dibawah temperatur $376,53^\circ\text{C}$ adalah terjadinya penguapan air dan pemutusan awal ikatan antar molekul polimer HDPE yang menghasilkan radikal. Kemudian mulai pada temperatur $376,53^\circ\text{C}$ terjadi pemutusan ikatan antar molekul polimer HDPE dalam jumlah yang sangat besar. Hal ini terjadi selain akibat dari peningkatan temperatur dan juga dibantu oleh radikal yang dihasilkan dari pemutusan ikatan antar molekul HDPE itu sendiri, juga dibantu oleh nanokatalis MnFe_2O_4 yang membantu melemahkan dan memutuskan ikatan antar molekul HDPE sehingga menghasilkan radikal yang lebih banyak dalam waktu yang lebih cepat hingga berakhir pada temperatur $503,30^\circ\text{C}$ yang ditandai dengan kembalinya garis massa konstan. Laju penyusutan massa maksimum terjadi pada temperatur $483,04^\circ\text{C}$ yaitu sebesar $0,59\%/s$.

Dari data hasil uji TG pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 Pada *heating rate* $10^\circ\text{C}/\text{menit}$ diketahui bahwa massa yang tersisa setelah akhir

proses dekomposisi sangat sedikit yaitu hanya sebesar 0,02 mg yang artinya residu yang tersisa hanya sekitar 0,03% dari massa sampel awal yaitu 6,40 mg. Residu ini kemungkinan berasal katalis MnFe_2O_4 yang terbentuk kembali di akhir proses.

5.5.2.2 Hasil Uji Termogravimetri Sampah Plastik HDPE Dengan Penambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 Pada *Heating Rate* 15°C/menit

Pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan penambahan nanokatalis pada MnFe_2O_4 *heating rate* 15°C/menit telah diketahui dari hasil uji termogravimetri seperti ditunjukkan pada Gambar 5.9.



Gambar 5.9 Pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada *heating rate* 15°C/menit

Berdasarkan Gambar 5.9 diketahui bahwa degradasi termal utama pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada *heating rate* 15°C/menit terjadi pada rentang temperatur 385,40 – 510,61°C ditandai dengan adanya penyusutan massa yang sangat signifikan pada grafik TG. Hal ini berkaitan dengan degradasi komponen utama polimer yaitu rantai hidrokarbon yang terlepas dan menjadi volatil. Hal ini serupa dengan hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Sorum et al. (2001) yang menyatakan bahwa degradasi termal HDPE terjadi pada 350-500 °C yang berkaitan dengan degradasi hidrokarbon.

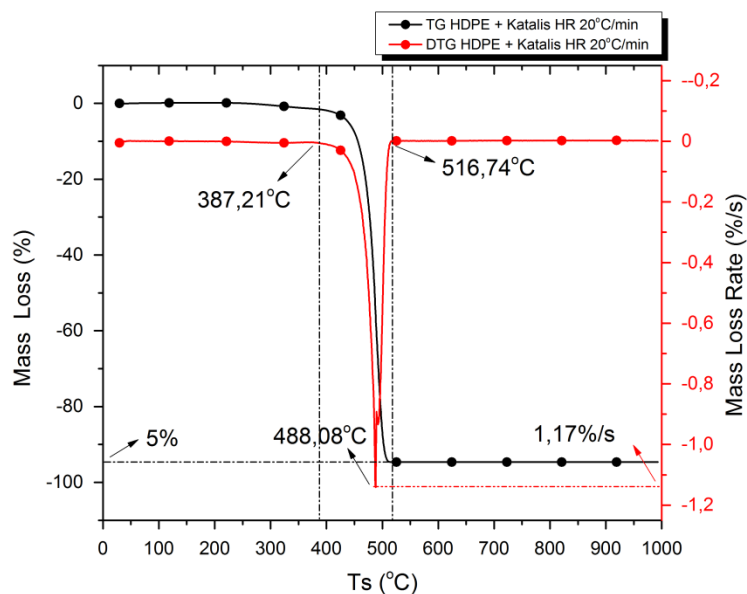
Dibawah temperatur 385,40°C adalah terjadinya penguapan air dan pemutusan awal ikatan antar molekul polimer HDPE yang menghasilkan radikal. Kemudian mulai pada

temperatur 385,40°C terjadi pemutusan ikatan antar molekul polimer HDPE dalam jumlah yang sangat besar. Hal ini terjadi selain akibat dari peningkatan temperatur dan juga dibantu oleh radikal yang dihasilkan dari pemutusan ikatan antar molekul HDPE itu sendiri, juga dibantu oleh nanokatalis MnFe_2O_4 yang membantu melemahkan dan memutuskan ikatan antar molekul HDPE sehingga menghasilkan radikal yang lebih banyak dalam waktu yang lebih cepat hingga berakhir pada temperatur 510,61°C yang ditandai dengan kembalinya garis massa konstan. Laju penyusutan massa maksimum terjadi pada temperatur 486,46°C yaitu sebesar 0,83%/s.

Dari data hasil uji TG pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 Pada *heating rate* 15°C/menit diketahui bahwa massa yang tersisa setelah akhir proses dekomposisi adalah sebesar 0,23mg yang artinya residu yang tersisa mendekati 3% dari massa sampel awal yaitu 6,53mg. Residu ini kemungkinan berasal dari sampel yang tidak terbakar, *fixed carbon* yang tersisa setelah proses pirolisis dan membentuk arang, kandungan mineral Na yang tidak bereaksi dengan unsur lain selama proses pirolisis sehingga tersisa menjadi residu dan juga dari kadar abu yang terkandung pada sampel dan katalis yang terbentuk kembali di akhir proses.

5.5.2.3 Hasil Uji Termogravimetri Sampah Plastik HDPE Dengan Penambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 Pada *Heating Rate* 20°C/menit

Pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan penambahan nanokatalis pada MnFe_2O_4 *heating rate* 20°C/menit telah diketahui dari hasil uji termogravimetri seperti ditunjukkan pada Gambar 5.10.



Gambar 5.10 Pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe₂O₄ pada *heating rate* 20°C/menit

Berdasarkan Gambar 5.10 diketahui bahwa degradasi termal utama pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe₂O₄ pada *heating rate* 20°C/menit terjadi pada rentang temperatur 387,21 – 516,74°C. Hal ini berkaitan dengan degradasi komponen utama polimer yaitu rantai hidrokarbon yang terlepas dan menjadi volatil. Hal ini serupa dengan hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Sorum et al. (2001) yang menyatakan bahwa degradasi termal HDPE terjadi pada 350-500 °C yang berkaitan dengan degradasi hidrokarbon.

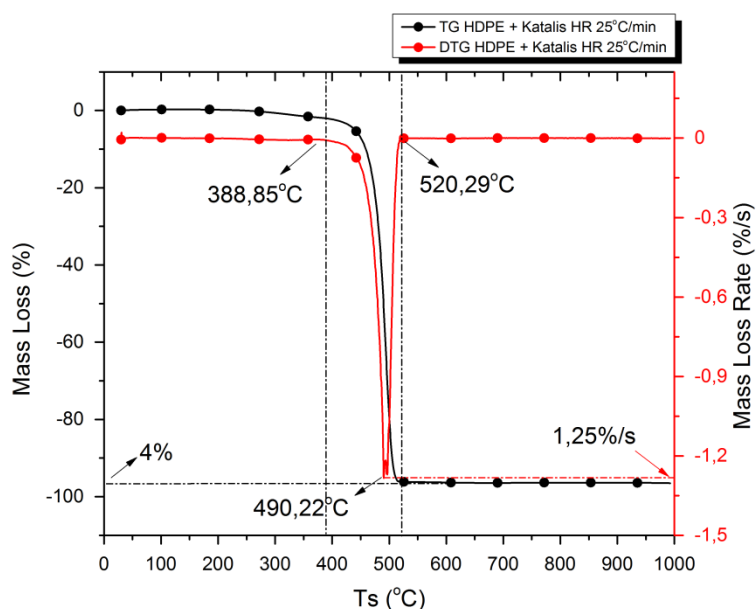
Dibawah temperatur 387,21°C adalah terjadinya penguapan air dan pemutusan awal ikatan antar molekul polimer HDPE yang menghasilkan radikal. Kemudian mulai pada temperatur 387,21°C terjadi pemutusan ikatan antar molekul polimer HDPE dalam jumlah yang sangat besar. Hal ini terjadi selain akibat dari peningkatan temperatur dan juga dibantu oleh radikal yang dihasilkan dari pemutusan ikatan antar molekul HDPE itu sendiri, juga dibantu oleh nanokatalis MnFe₂O₄ yang membantu melemahkan dan memutuskan ikatan antar molekul HDPE sehingga menghasilkan radikal yang lebih banyak dalam waktu yang lebih cepat hingga berakhir pada temperatur 516,74°C yang ditandai dengan kembalinya garis massa konstan. Laju penyusutan massa maksimum terjadi pada temperatur 488,08°C yaitu sebesar 0,17%/s.

Dari data hasil uji TG pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe₂O₄ Pada *heating rate* 20°C/menit diketahui bahwa massa yang tersisa setelah akhir

proses dekomposisi adalah sebesar 0,33 mg yang artinya residu yang tersisa mendekati 5% dari massa sampel awal yaitu 6,18 mg. Residu ini kemungkinan berasal dari sampel yang tidak terbakar, *fixed carbon* yang tersisa setelah proses pirolisis dan membentuk arang, kandungan mineral Na yang tidak bereaksi dengan unsur lain selama proses pirolisis sehingga tersisa menjadi residu dan juga dari kadar abu yang terkandung pada sampel dan katalis yang terbentuk kembali di akhir proses.

5.5.2.4 Hasil Uji Termogravimetri Sampah Plastik HDPE Dengan Penambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 Pada *Heating Rate* $25^\circ\text{C}/\text{menit}$

Pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan penambahan nanokatalis pada MnFe_2O_4 *heating rate* $25^\circ\text{C}/\text{menit}$ telah diketahui dari hasil uji termogravimetri seperti ditunjukkan pada Gambar 5.11.



Gambar 5.11 Pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada *heating rate* $25^\circ\text{C}/\text{menit}$

Berdasarkan Gambar 5.11 diketahui bahwa degradasi termal utama pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada *heating rate* $25^\circ\text{C}/\text{menit}$ terjadi pada rentang temperatur $388,85 - 520,29^\circ\text{C}$. Hal ini berkaitan dengan degradasi komponen utama polimer yaitu rantai hidrokarbon yang terlepas dan menjadi volatil. Hal ini serupa dengan hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Sorum et al. (2001) yang menyatakan bahwa degradasi termal HDPE terjadi pada $350-500^\circ\text{C}$ yang berkaitan dengan degradasi hidrokarbon.

Dibawah temperatur 388,85°C adalah terjadinya penguapan air dan pemutusan awal ikatan antar molekul polimer HDPE yang menghasilkan radikal. Kemudian mulai pada temperatur 388,85°C terjadi pemutusan ikatan antar molekul polimer HDPE dalam jumlah yang sangat besar. Hal ini terjadi selain akibat dari peningkatan temperatur dan juga dibantu oleh radikal yang dihasilkan dari pemutusan ikatan antar molekul HDPE itu sendiri, juga dibantu oleh nanokatalis MnFe_2O_4 yang membantu melemahkan dan memutuskan ikatan antar molekul HDPE sehingga menghasilkan radikal yang lebih banyak dalam waktu yang lebih cepat hingga berakhir pada temperatur 520,29°C yang ditandai dengan kembalinya garis massa konstan. Laju penyusutan massa maksimum terjadi pada temperatur 490,22°C yaitu sebesar 1,25%/s.

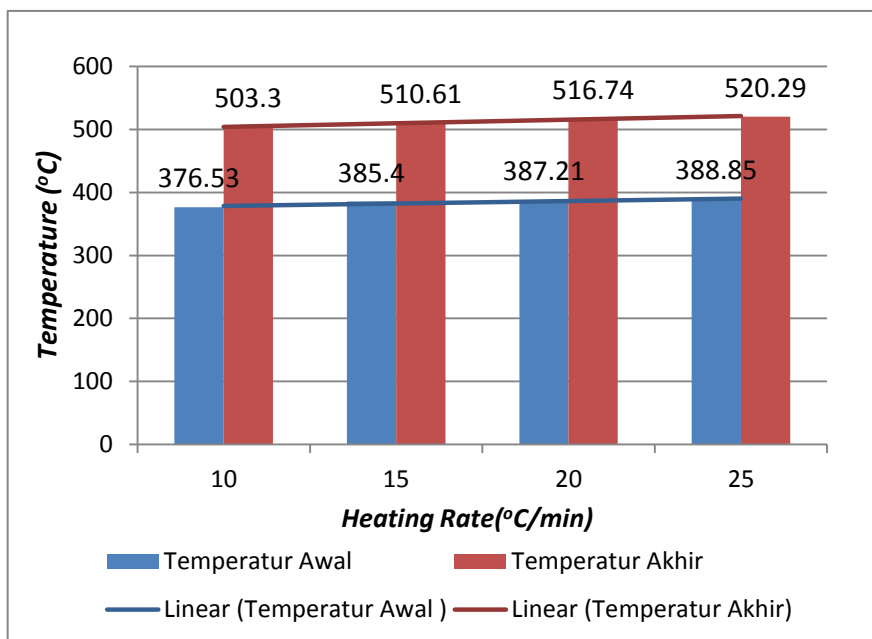
Dari data hasil uji TG pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 Pada *heating rate* 25°C/menit diketahui bahwa massa yang tersisa setelah akhir proses dekomposisi adalah sebesar 0,25 mg yang artinya residu yang tersisa mendekati 4% dari massa sampel awal yaitu 6,47 mg. Residu ini kemungkinan berasal dari sampel yang tidak terbakar, *fixed carbon* yang tersisa setelah proses pirolisis dan membentuk arang, kandungan mineral Na yang tidak bereaksi dengan unsur lain selama proses pirolisis sehingga tersisa menjadi residu dan juga dari kadar abu yang terkandung pada sampel dan katalis yang terbentuk kembali di akhir proses.

Dari pola dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada berbagai variasi *heating rate* yaitu 10, 15, 20 dan 25°C/min terjadi pergeseran temperatur awal dan akhir tahap dekomposisi dan ditampilkan pada Tabel 5.10 dan Gambar 5.12.

Tabel 5.10

Pergeseran Temperatur Awal dan Akhir Tahap Dekomposisi Pirolisis Sampah Plastik HDPE dengan Tambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 pada Variasi Heating Rate

Pergeseran Temperatur Awal dan Akhir Tahap Dekomposisi Pirolisis Sampah Plastik HDPE dengan Tambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 pada Variasi Heating Rate			
No	Heating Rate (°C/min)	T Awal (°C)	T Akhir (°C)
1	10	376,53	503,30
2	15	385,40	510,61
3	20	387,21	516,74
4	25	388,85	520,29



Gambar 5.12 Pergeseran temperatur awal dan akhir tahap dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada variasi *heating rate*

Dari Tabel 5.10 dan Gambar 5.12 diketahui bahwa seiring dengan peningkatan *heating rate* menyebabkan temperatur awal dan akhir tahap dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 . Semakin tinggi *heating rate* menyebabkan pergeseran temperatur awal dan akhir tahap dekomposisi ke temperatur yang lebih tinggi. Hal ini terjadi karena pada proses pirolisis dengan *heating rate* yang lebih tinggi maka tidak cukup waktu untuk perpindahan panas dari permukaan sampel ke bagian dalam sampel sehingga temperatur bagian sampel lebih rendah daripada temperatur permukaan sampel. Hal ini memungkinkan panas di bagian dalam sampel belum cukup untuk memutuskan ikatan antar molekul sampel sehingga pemutusan ikatan antar molekul sampel tertunda ke temperatur yang lebih tinggi. Selain itu, jika perbedaan temperatur antara permukaan dengan bagian dalam sampel terlalu besar bisa mengakibatkan bagian permukaan sampel mengalami hangus terlebih dulu dan menghasilkan kerak. Dan jika kerak yang dihasilkan tersebut memiliki konduktivitas termal yang rendah maka juga akan menghambat difusi panas dari permukaan ke bagian dalam sampel. Akibatnya panas dibagian dalam sampel belum cukup untuk memutuskan ikatan antar molekul sehingga proses awal dekomposisi terjadi pada temperatur yang lebih tinggi. Karena temperatur awal dekomposisi bergeser ke temperatur yang lebih tinggi, maka temperatur akhir dekomposisi juga bergeser ke temperatur yang lebih tinggi.

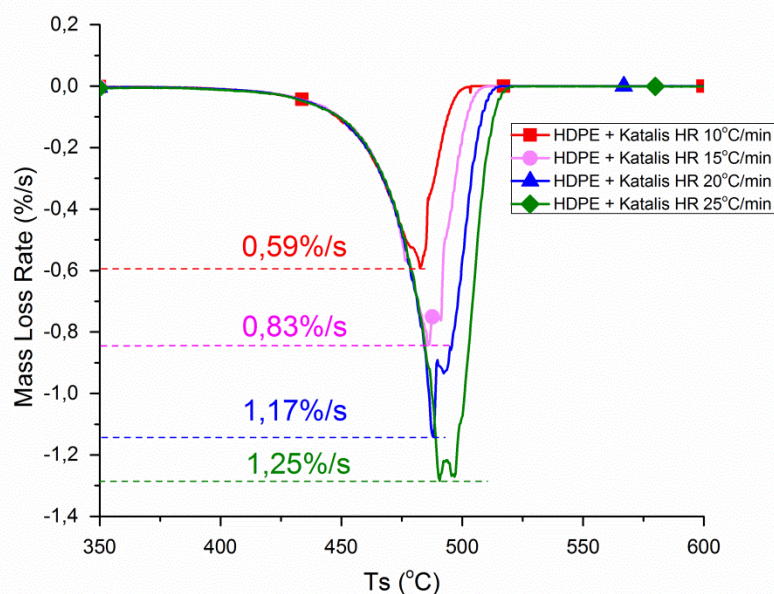
Disisi lain, peningkatan *heating rate* mulai 10, 15, 20 dan 25 °C/min menguntungkan pada laju penyusutan massa proses pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan

nanokatalis MnFe_2O_4 karena laju penyusutan massa maksimum meningkat seiring dengan peningkatan *heating rate* seperti ditunjukkan pada Tabel 5.11 dan Gambar 5.13.

Tabel 5.11

Laju Penyusutan Massa Pirolisis Sampah Plastik HDPE Dengan Tambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 Pada Variasi Heating Rate

Laju penyusutan massa pirolisis sampah plastik HDPE + Nanokatalis MnFe_2O_4		
No	Heating Rate ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	Laju penyusutan massa maksimum ($\%/s$)
1	10	0,59
2	15	0,83
3	20	1,17
4	25	1,25



Gambar 5.13 Laju penyusutan massa pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada variasi *heating rate*

Dari Tabel 5.11 dan Gambar 5.13 diketahui bahwa bahwa laju penyusutan massa maksimum proses pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 meningkat seiring dengan peningkatan *heating rate*, dimana laju penyusutan massa tertinggi terjadi pada *heating rate* 25 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ yaitu sebesar 1,25%/s. Hal ini terjadi karena pada *heating rate* yang tinggi maka penambahan temperatur pada sampel/perubahan temperatur sampel terjadi lebih cepat yang menyebabkan gerakan atom-atom penyusun molekul sampel HDPE (baik gerakan vibrasi maupun translasi) menjadi lebih cepat. Yahya et al. (2013) juga menyatakan bahwa peningkatan temperatur menyebabkan peningkatan vibrasi termal atom. Hal ini menyebabkan ikatan antar molekul sampel menjadi semakin tidak stabil, dimana ikatan antar molekulnya semakin merenggang dan semakin melemah sehingga lebih cepat terputus.

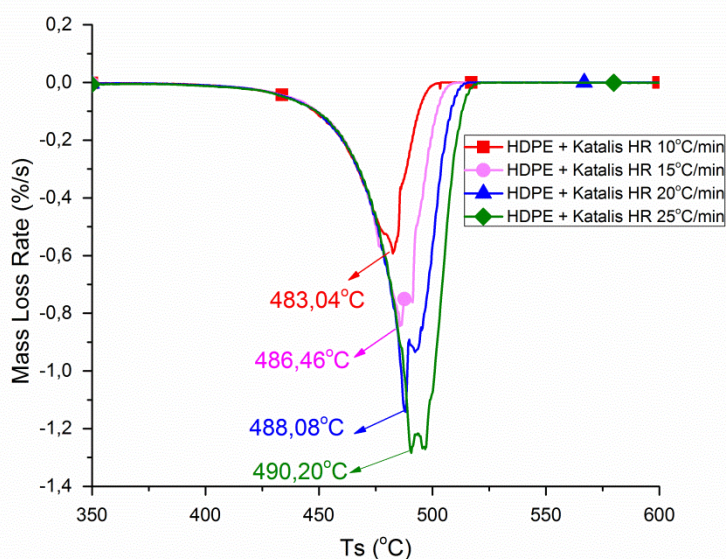
Lebih dari itu dengan bantuan dari nanokatalis MnFe_2O_4 yang membantu melemahkan dan memutuskan ikatan antar molekul sampel HDPE menyebabkan banyak radikal yang terbentuk dan membantu mempercepat pemutusan ikatan antar molekul yang lain sehingga laju dekomposisinya lebih cepat.

Peningkatan *heating rate* mulai 10, 15, 20 dan $25^\circ\text{C}/\text{min}$ juga menyebabkan pergeseran temperatur puncak dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 seperti dijelaskan pada Tabel 5.12 dan Gambar 5.14.

Tabel 5.12

Pergeseran Temperatur Puncak Tahap Dekomposisi Pirolisis Sampah Plastik HDPE Dengan Tambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 pada Variasi Heating Rate

Pergeseran temperatur puncak dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE + Nanokatalis MnFe_2O_4		
No	Heating Rate($^\circ\text{C}/\text{min}$)	T puncak dekomposisi ($^\circ\text{C}$)
1	10	483,04
2	15	486,46
3	20	488,08
4	25	490,22



Gambar 5.14 Pergeseran temperatur puncak tahap dekomposisi sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada variasi *heating rate*

Tabel 5.12 dan Gambar 5.14 diketahui bahwa seiring peningkatan *heating rate*, maka terjadi pergeseran temperatur puncak dekomposisi, dimana temperatur puncak dekomposisi bergeser ke temperatur yang lebih tinggi. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa seiring dengan peningkatan *heating rate* menyebabkan peningkatan temperatur awal dekomposisi. Peningkatan temperatur awal dekomposisi secara otomatis juga meningkatkan temperatur puncak dekomposisi ke temperatur yang lebih tinggi.

Namun demikian, meskipun temperatur puncak dekomposisi bergeser ke temperatur yang lebih tinggi, peningkatan *heating rate* meningkatkan laju penyusutan massa maksimum pada proses pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 seperti dijelaskan pada Gambar 5.13.

Peningkatan *heating rate* mulai 10, 15, 20 dan $25^\circ\text{C}/\text{min}$ juga berpengaruh pada residu yang tersisa pada proses pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 . Residu yang tersisa dari proses pirolisis sampah plastik HDPE pada variasi *heating rate* seperti dijelaskan pada Tabel 5.13.

Tabel 5.13

Residu Pada Proses Pirolisis Sampah Plastik HDPE Dengan Tambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 Pada Variasi Heating Rate

Residu pada proses pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada variasi <i>heating rate</i>				
No	HR	HDPE		
		Massa Awal (mg)	Residu Residu (mg)	Residu (wt%)
1	10	6,40	0,02	0,3
2	15	6,53	0,23	3
3	20	6,18	0,33	5
4	25	6,47	0,25	4

Dari Tabel 5.13 diketahui bahwa residu yang tersisa pada proses pirolisis sampah plastik HDPE sangat sedikit. Residu ini kemungkinan berasal dari sampel yang tidak terbakar, *fixed carbon* yang tersisa setelah proses pirolisis dan membentuk arang, kandungan mineral Na yang tidak bereaksi dengan unsur lain selama proses pirolisis sehingga tersisa menjadi residu dan juga dari kadar abu yang terkandung pada sampel juga dari nanokatalis MnFe_2O_4 yang terbentuk kembali di akhir proses. Karena residu yang dihasilkan pada proses pirolisis sampah plastik HDPE ini sangat sedikit sehingga untuk penanganan residunya bisa lebih hemat dan mudah.

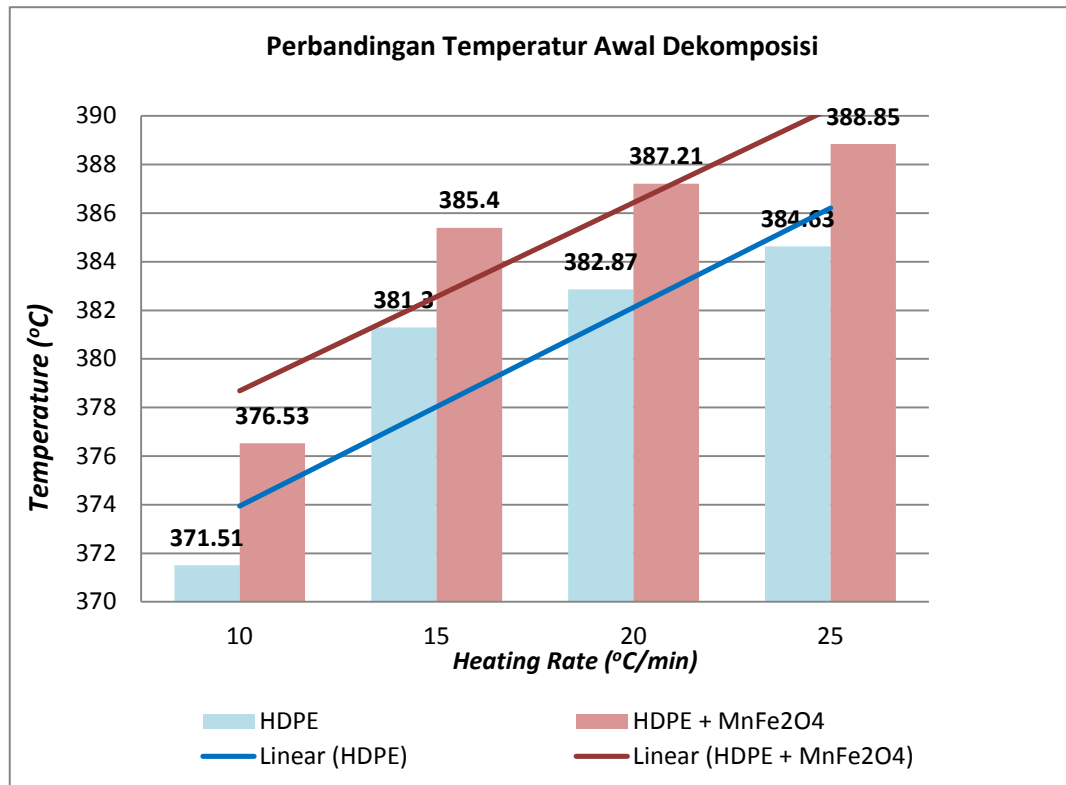
5.5.3 Perbandingan Temperatur Awal dan Akhir Tahap Dekomposisi Pirolisis Sampah Plastik HDPE Tanpa dan Dengan Penambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 Pada Variasi *Heating Rate*

Data perbandingan temperatur awal dan akhir tahap dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE tanpa dan dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada variasi *heating rate* disajikan pada Tabel 5.14 dan Gambar 5.15 – 5.16.

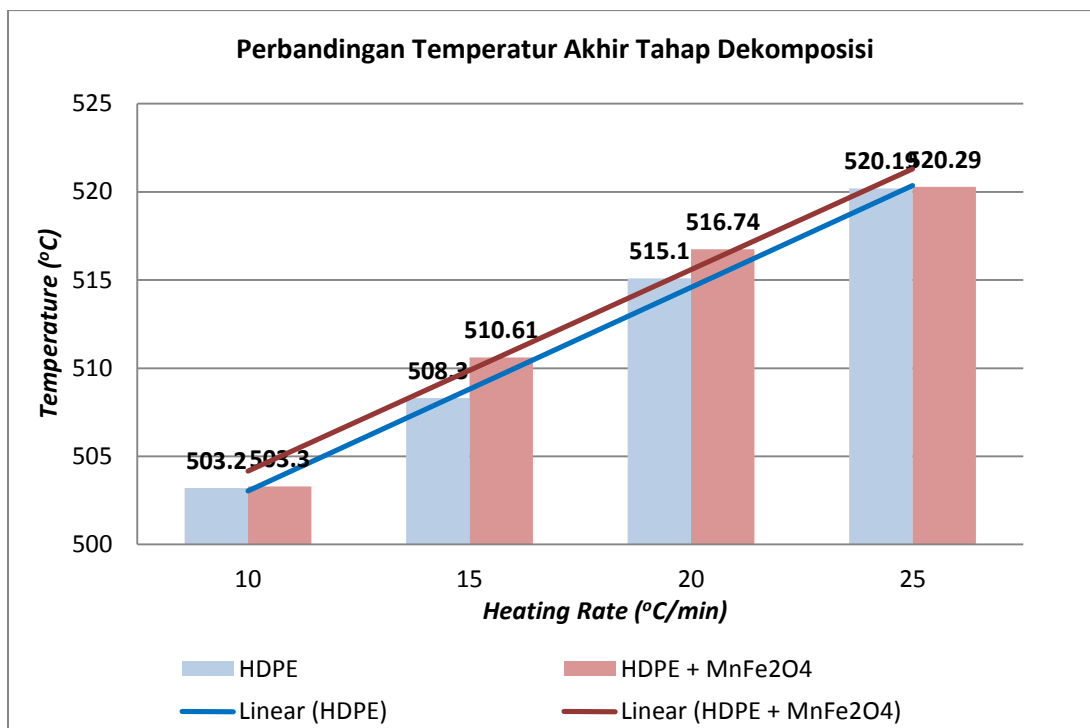
Tabel 5.14

Perbandingan Temperatur Awal dan Akhir Tahap Dekomposisi Pirolisis Sampah Plastik HDPE Tanpa dan Dengan Penambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 Pada Variasi Heating Rate

Temperatur Awal Dan Akhir Tahap Dekomposisi ($^{\circ}\text{C}$)					
No	HR	HDPE		HDPE + Nanokatalis MnFe_2O_4	
		Awal ($^{\circ}\text{C}$)	Akhir ($^{\circ}\text{C}$)	Awal ($^{\circ}\text{C}$)	Akhir ($^{\circ}\text{C}$)
1	10	371,51	503,20	376,53	503,30
2	15	381,30	508,30	385,40	510,61
3	20	382,87	515,10	387,21	516,74
4	25	384,63	520,19	388,85	520,29



Gambar 5.15 Perbandingan temperatur awal dekomposisi sampah plastik HDPE tanpa dan dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada variasi *heating rate*



Gambar 5.16 Perbandingan temperatur akhir dekomposisi sampah plastik HDPE tanpa dan dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada variasi *heating rate*

Dari Tabel 5.14 dan Gambar 5.15-5.16 diketahui bahwa terjadi pergeseran temperatur awal dan akhir tahap dekomposisi sampah plastik HDPE tanpa tambahan nanokatalis terhadap dekomposisi sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 dimana awal dan akhir tahap dekomposisi sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis justru terjadi pada temperatur yang lebih tinggi. Hal ini terjadi karena panas yang seharusnya diserap langsung untuk memutuskan ikatan antar molekul sampel diserap dulu oleh MnFe_2O_4 untuk merubah struktur kristal MnFe_2O_4 yaitu perubahan distribusi kation Mn pada sisi tetrahedral dan oktahedral dan proses ini terjadi pada kisaran temperatur 300°C (Aijun et al. 2011) dan pada kondisi tersebut lattice MnFe_2O_4 berada pada kondisi metastabil (Bonsdorf et al. 1997). Selanjutnya, saat kondisi katalis sudah stabil dan panas yang diserap sudah cukup untuk mengaktifkan katalis maka panas akan langsung diserap oleh sampel untuk memutuskan ikatan polimer sampel. Lebih dari itu, dibantu dengan peran katalis tersebut menyebabkan pemutusan ikatan antar molekul sampel menjadi lebih cepat ditunjukkan dengan laju penyusutan massa maksimal yang lebih tinggi daripada sampah plastik HDPE tanpa tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 yang ditunjukkan pada Tabel 5.15 dan Gambar 5.17 – 5.21.

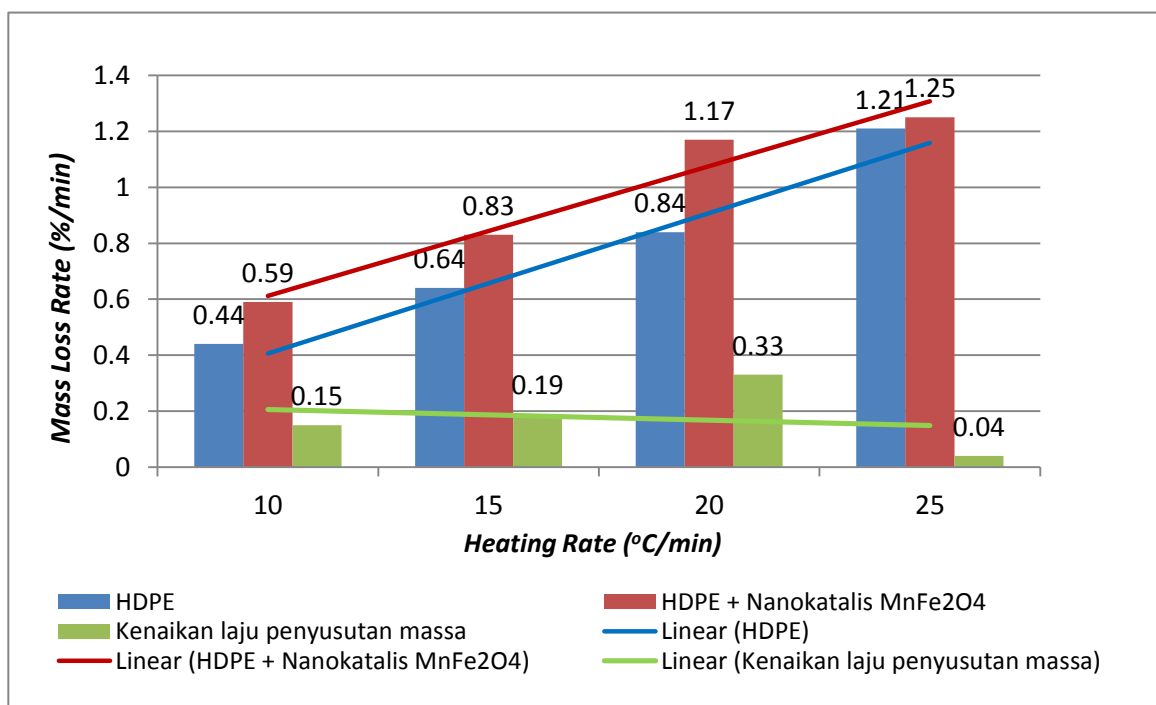
5.5.4 Perbandingan Laju Penyusutan Massa Pada Pirolisis Sampah Plastik HDPE Tanpa dan Dengan Tambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 Pada Variasi *Heating Rate*

Laju penyusutan massa pirolisis sampah plastik HDPE tanpa dan dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada variasi *heating rate* disajikan pada Tabel 5.15 dan Gambar 5.17 - 5.18a-d.

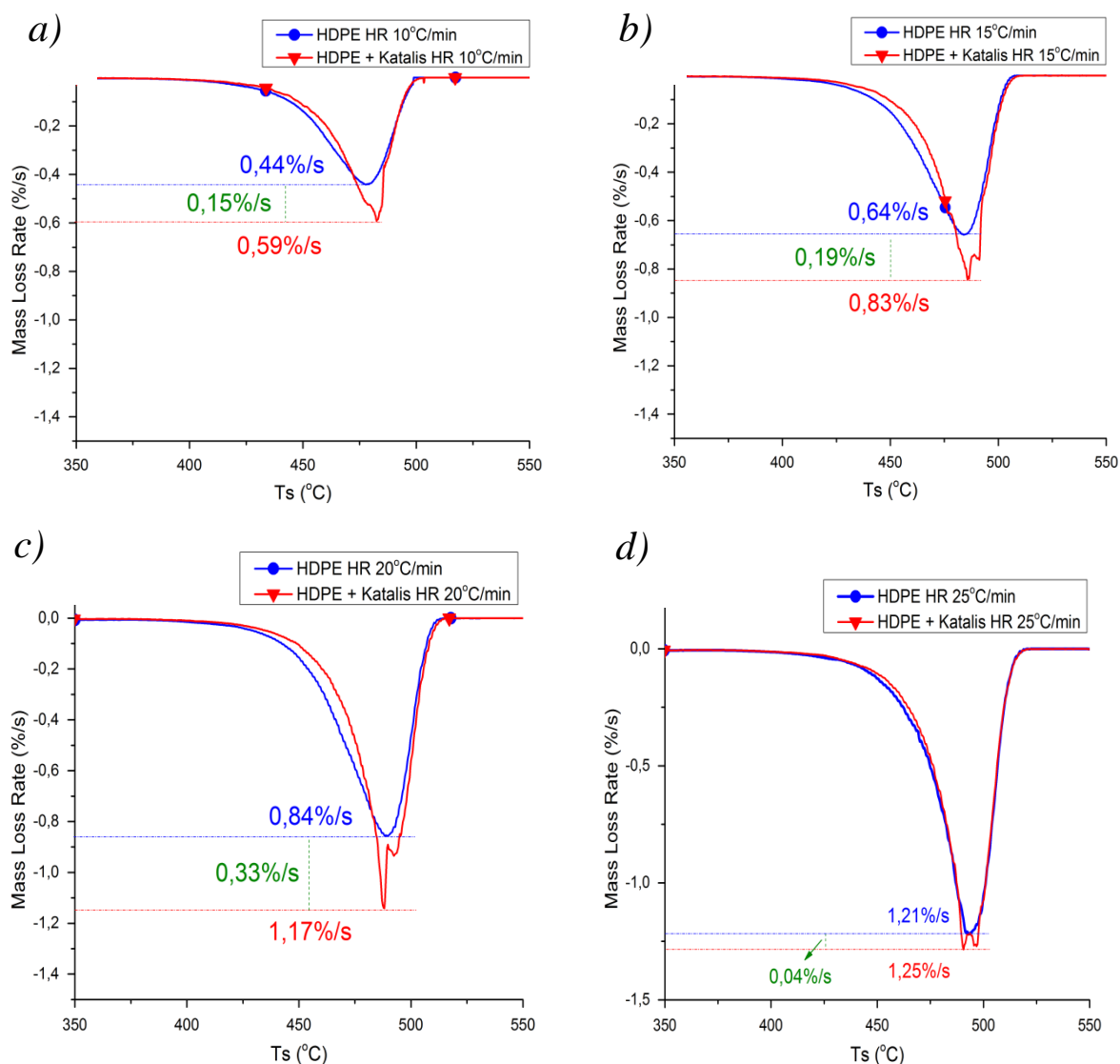
Tabel 5.15

*Laju Penyusutan Massa Pirolisis Sampah Plastik HDPE Tanpa dan Dengan Tambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 Pada Variasi *Heating Rate**

Laju Penyusutan Massa Maksimum Pirolisis Sampah Plastik HDPE Tanpa dan Dengan Tambahan Nanokatalis MnFe_2O_4				
No	HR (°C/min)	HDPE (%/s)	HDPE + Nanokatalis MnFe_2O_4 (%/s)	Kenaikan laju penyusutan massa
1	10	0,44	0,59	0,15
2	15	0,64	0,83	0,19
3	20	0,84	1,17	0,33
4	25	1,21	1,25	0,04



Gambar 5.17 Laju penyusutan massa pada proses pirolisis sampah plastik HDPE tanpa dan dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada variasi *heating rate*



Gambar 5.18 Perbandingan laju penyusutan massa maksimum proses pirolisis sampah plastik HDPE tanpa dan dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada *heating rate* (a) 10°C/min, (b) 15°C/min, (c) 20°C/min, (d) 25°C/min

Dari Tabel 5.15 dan Gambar 5.17 dan 5.18a-d diketahui bahwa penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 menyebabkan peningkatan laju penyusutan massa maksimum pada proses pirolisis sampah plastik HDPE. Peningkatan laju penyusutan massa maksimum terjadi pada proses pirolisis dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 . Hal ini terjadi karena pada proses pirolisis sampah plastik HDPE dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 proses pemutusan ikatan antar molekul polimer HDPE tidak hanya disebabkan oleh panas yang diberikan kepada sampel, tetapi juga dibantu oleh nanokatalis MnFe_2O_4 yang membantu melemahkan dan memutuskan ikatan antar molekul sampel. Peran nanokatalis

MnFe₂O₄ dalam membantu mempercepat laju pemutusan ikatan antar molekul sampel HDPE dijelaskan sebagai berikut :

Nanokatalis MnFe₂O₄ terdiri dari dua sublattice yaitu Mn dan Fe. Unsur Mn memiliki nomor atom 25 yang artinya unsur Mn memiliki 25 proton dalam inti atomnya dan juga memiliki 25 elektron. Sedangkan unsur Fe memiliki nomor atom 26 yang artinya unsur Fe memiliki 26 proton dalam inti atomnya dan juga memiliki 26 elektron. Di dalam bentuk katalis MnFe₂O₄, Mn dan Fe berupa ion yaitu ion Mn²⁺ dan Fe³⁺. Dalam kondisi ion, ion Mn²⁺ dan Fe³⁺ sama-sama memiliki 5 elektron tidak berpasangan pada orbital terluarnya, yaitu orbital d. Elektron yang tidak berpasangan ini bersifat sangat reaktif, sehingga saat partikel nanokatalis MnFe₂O₄ mendekati ikatan polimer HDPE, maka ion Mn²⁺ dan Fe³⁺ ini akan cenderung menarik elektron dari ikatan antar molekul HDPE, sehingga ikatan antar molekulnya menjadi tidak stabil, kemudian ikatannya semakin melemah dan lebih cepat terputus dan menghasilkan radikal baru. Sehingga, pemutusan ikatan antar molekul HDPE menjadi semakin cepat karena bantuan dari nanokatalis MnFe₂O₄ dan akan menghasilkan radikal baru yang juga semakin banyak. Kemudian radikal-radikal tersebut juga mengganggu kestabilan ikatan polimer HDPE yang belum terputus sehingga bisa terputus lebih cepat.

Pada dasarnya, meskipun ion Mn²⁺ dan Fe³⁺ keduanya sama-sama memiliki 5 elektron tidak berpasangan pada orbital terluarnya, akan tetapi ion Fe³⁺ memiliki gaya/kekuatan yang lebih besar untuk menarik elektron dari luar (dalam hal ini elektron dari ikatan polimer HDPE) daripada ion Mn²⁺. Ini karena ion Fe³⁺ memiliki kekuatan inti atom dan energi inti atom yang lebih besar daripada ion Mn²⁺. Pernyataan ini akan dibuktikan dengan perhitungan kekuatan inti atom dan energi inti atom menggunakan faktor perisai */shielding effect* dari persamaan berikut:

a. Persamaan untuk menghitung kekuatan inti atom:

$$Z_{ef} = Z - \sigma \quad (\text{Sugiyarto, 2014})$$

Dimana, Z adalah kekuatan asli inti atom (total proton) untuk menarik elektron (baik elektron yang dimilikinya sendiri maupun elektron dari luar). Z ini umumnya dinyatakan sebagai jumlah proton yang dimiliki oleh sebuah atom. Z_{ef} adalah kekuatan inti atom untuk menarik elektron tertentu, dan σ adalah faktor perisai, dimana nilai faktor perisai ini ditentukan dengan prosedur berikut (Sugiyarto, 2014) :

- 1) Elektron dikelompokkan menurut urutan (1s), (2s, 2p), (3s, 3p), (3d), (4s, 4p), (4d), (4f) dan seterusnya, dimana ns dan np dipertimbangkan dalam satu kelompok.

- 2) Elektron yang berada di orbital lebih luar dari elektron yang akan dicari *shielding effectnya* tidak menamengi sama sekali elektron yang tersebut.
- 3) Nilai faktor perisai dari elektron-elektron yang menduduki orbital yang sama dengan elektron yang dicari *shielding effectnya* adalah sebesar 0,35 kecuali untuk elektron 1s (misal atom hidrogen) maka nilai faktor perisainya hanya 0,30.
- 4) Elektron-elektron ns dan np memiliki faktor perisai sebesar 0,85 dari setiap elektron dalam kulit/kelompok dibawahnya (n-1) dan memiliki faktor perisai 1,0 dari setiap elektron yang jauh dibawahnya.

Selanjutnya,

- Konfigurasi elektron $_{26}\text{Fe}$: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6 4s^2$, dalam kondisi ion Fe^{3+} konfigurasi elektronnya menjadi Fe^{3+} : $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5$. Saat akan menghitung kekuatan inti ion Fe^{3+} untuk menarik salah satu elektron terluar di orbitnya (Z_{ef}) maka perhitungannya menjadi:

Fe^{3+} : $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^4$, di orbital d nya dianggap ada 4 elektron, karena 1 elektronnya digunakan sebagai elektron yang akan ditarik oleh inti atom, sehingga :

$$\sigma\text{Fe}^{3+} : [(1s^2) (2s^2 2p^6)] [(3s^2 3p^6)] [(3d^4)]$$

$$\sigma\text{Fe}^{3+} = (10 \times 1,0) + (8 \times 0,85) + (4 \times 0,35)$$

$$\sigma\text{Fe}^{3+} = 10 + 6,80 + 1,40 = 18,2$$

Sehingga,

$$Z_{ef}(\text{Fe}^{3+}) = Z - \sigma$$

$$Z_{ef}(\text{Fe}^{3+}) = 26 - 18,2 = \mathbf{7,8}$$

- Konfigurasi elektron $_{25}\text{Fe}$: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5 4s^2$, dalam kondisi ion Mn^{2+} konfigurasi elektronnya menjadi Mn^{2+} : $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5$. Saat akan menghitung kekuatan inti ion Mn^{2+} untuk menarik salah satu elektron terluar di orbitnya (Z_{ef}) maka perhitungannya menjadi:

Mn^{2+} : $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^4$, di orbital d nya dianggap ada 4 elektron, karena 1 elektronnya digunakan sebagai elektron yang akan ditarik oleh inti atom, sehingga :

$$\sigma\text{Mn}^{2+} : [(1s^2) (2s^2 2p^6)] [(3s^2 3p^6)] [(3d^4)]$$

$$\sigma\text{Mn}^{2+} = (10 \times 1,0) + (8 \times 0,85) + (4 \times 0,35)$$

$$\sigma\text{Mn}^{2+} = 10 + 6,80 + 1,40 = 18,2$$

Sehingga,

$$Z_{ef}(\text{Mn}^{2+}) = Z - \sigma$$

$$Z_{ef}(\text{Mn}^{2+}) = 25 - 18,2 = \mathbf{6,8}$$

Sehingga, dari perhitungan kekuatan inti atom di atas, diketahui bahwa ion Fe^{3+} memiliki kekuatan yang lebih besar yaitu 7,8 untuk menarik satu elektron di orbital terluarnya daripada ion Mn^{2+} yang hanya sebesar 6,8. Artinya, ion Fe^{3+} juga memiliki kekuatan yang lebih besar untuk menarik elektron dari luar dibandingkan ion Mn^{2+} .

b. Persamaan untuk menghitung energi inti atom

$$E = \left(\frac{-(Z-\sigma)^2}{n^2} \right) 13,6\text{eV} \quad (\text{Sugiarto, 2014})$$

Dimana, E adalah energi inti atom, Z adalah kekuatan asli inti atom, n adalah orbital dan $13,6\text{eV}$ adalah tetapan, sehingga:

$$\begin{aligned} \bullet \quad E \text{ Fe}^{3+} &= \left(\frac{-(26-18,2)^2}{3^2} \right) \times 13,6 \text{ eV} \\ &= \left(\frac{-(7,8)^2}{3^2} \right) \times 13,6 \text{ eV} \\ &= \left(\frac{-(60,84)}{9} \right) \times 13,6 \text{ eV} \\ &= (-6,76) \times 13,6 \text{ eV} \\ &= -91,936 \text{ eV} \\ \mathbf{E \text{ Fe}^{3+}} &= \mathbf{|91,94 \text{ eV}|} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bullet \quad E \text{ Mn}^{2+} &= \left(\frac{-(25-18,2)^2}{3^2} \right) \times 13,6 \text{ eV} \\ &= \left(\frac{-(6,8)^2}{3^2} \right) \times 13,6 \text{ eV} \\ &= \left(\frac{-(46,24)}{9} \right) \times 13,6 \text{ eV} \\ &= (-5,1378) \times 13,6 \text{ eV} \\ &= -69,87408 \text{ eV} \\ \mathbf{E \text{ Mn}^{2+}} &= \mathbf{|69,87 \text{ eV}|} \end{aligned}$$

Berdasarkan kedua perhitungan di atas, diketahui bahwa kekuatan inti atom dan energi inti atom untuk menarik elektron terluarnya yang dimiliki oleh ion Fe^{3+} lebih besar daripada yang dimiliki ion Mn^{2+} . Ini berarti, saat ion Fe^{3+} dan Mn^{2+} bekerja secara katalitik dalam proses pirolisis HDPE, maka kinerja ion Fe^{3+} dalam membantu memutuskan ikatan antar molekul HDPE lebih besar/lebih dominan daripada ion Mn^{2+} .

Dari Gambar 5.17 dan 5.18a-d diketahui bahwa laju laju penyusutan massa tertinggi terjadi pada pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada *heating rate* $25^\circ\text{C}/\text{menit}$ yaitu sebesar $1,25\%/s$. Namun demikian, meskipun laju penyusutan massa tertinggi terjadi pada *heating rate* $25^\circ\text{C}/\text{menit}$ tetapi kenaikan laju

penyusutan yang paling baik akibat penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 terjadi pada *heating rate* $20^\circ\text{C}/\text{menit}$ dengan peningkatan sebesar $0,33\%/s$. Sedangkan kenaikan laju penyusutan yang paling rendah terjadi pada *heating rate* $25^\circ\text{C}/\text{menit}$ dengan kenaikan hanya sebesar $0,04\%/s$. Alasan ilmiah yang menyebabkan pada *heating rate* $25^\circ\text{C}/\text{menit}$ perbedaan laju penyusutan massa maksimum antara pirolisis sampah plastik HDPE tanpa dan dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 paling rendah daripada tiga *heating rate* yang lain adalah sebagai berikut:

- 1) Pada dasarnya, pada pada temperatur ruangan, suatu atom akan terus bergerak. Ketika temperatur dinaikkan, maka gerakan atom juga akan semakin, percepatan gerakanya juga semakin tinggi, sehingga momen inersia atom tersebut juga tinggi. Yahya et al (2013) juga menyatakan bahwa peningkatan temperatur juga meningkatkan vibrasi termal atom. Dengan demikian, semakin tinggi temperatur, gerakan atom (baik gerak vibrasi, rotasi maupun translasi) akan meningkat, sehingga menyebabkan ikatan antar atom lebih cepat terputus (membutuhkan waktu yang sangat singkat untuk terputus). Dan pada *heating rate* $25^\circ\text{C}/\text{menit}$, kemungkinan ikatan antar molekul HDPE sudah terputus terlebih dulu sebelum dibantu oleh nanokatalis MnFe_2O_4 , sehingga terlihat di Gambar 5.18d bahwa penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 tidak begitu membantu menaikkan laju penyusutan massa proses pirolisis sampah plastik HDPE.
- 2) Setiap atom/senyawa memiliki entropi. Entropi adalah energi yang menunjukkan ketidak beraturan suatu zat (termasuk atom dan senyawa). Ketika suatu atom diberikan panas/energi dari luar, maka entropinya akan meningkat, artinya tingkat ketidak beraturannya akan meningkat. Pada material kristalin, semakin tinggi entropinya (entropi yang semakin tinggi ini bisa didapat dengan penambahan energi melalui pemberian panas/peningkatan temperatur), maka akan menurunkan kristalinitas dari material tersebut. Dan jika temperatur terus dinaikkan, maka pada temperatur tertentu kristal tersebut akan rusak dan terdekomposisi. Hal ini juga berlaku pada nanokatalis MnFe_2O_4 . Nanokatalis MnFe_2O_4 berbentuk kristal kubik spinel. Pada saat dia digunakan sebagai katalis dalam proses pirolisis sampah plastik HDPE, maka pada temperatur 793°C ion Mn^{2+} akan mengalami oksidasi menjadi Mn^{3+} . Jika terjadi oksidasi seperti ini, maka kemampuan nanokatalis MnFe_2O_4 menarik elektron akan menurun, karena awalnya orbital d ion Mn^{2+} memiliki 5 elektron tidak berpasangan, tetapi setelah dia teroksidasi, maka dia hanya memiliki 4 elektron tidak berpasangan. Lebih dari itu, saat ion Mn^{2+} teroksidasi menjadi ion Mn^{3+} maka jari-jari ionnya semakin besar dan gerakan ionnya menjadi lebih kuat sehingga ion ini akan meleset

dari sisi tetrahedral MnFe_2O (sudah lepas dan tidak mendiami sisi tetrahedral MnFe_2O lagi). Kemudian jika temperatur terus dinaikkan maka nanokatalis MnFe_2O_4 akan terdekomposisi menjadi $\alpha\text{-Mn}_2\text{O}_3$ dan $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, yang mana dalam kondisi ini, berarti nanokatalis MnFe_2O_4 sudah dinyatakan rusak (Aijun et al. 2011). Namun demikian, $\alpha\text{-Mn}_2\text{O}_3$ dan $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ masih memiliki kemampuan katalitik, meskipun kemampuannya jauh berbeda dengan kondisi asli MnFe_2O_4 . Aijun et al (2011) juga menyatakan bahwa nanokatalis MnFe_2O_4 berada dalam kestabilan termal di bawah temperatur 524°C . Inilah faktor lain yang menyebabkan pada *heating rate* $25^\circ\text{C}/\text{min}$ pengaruh katalis terhadap laju penyusutan massa proses pirolisis sampah plastik HDPE tidak begitu nampak. Karena pada *heating rate* $25^\circ\text{C}/\text{min}$ nanokatalis MnFe_2O_4 sudah mendekati temperatur batas maksimum kestabilannya, sehingga performa katalitiknya sudah melemah.

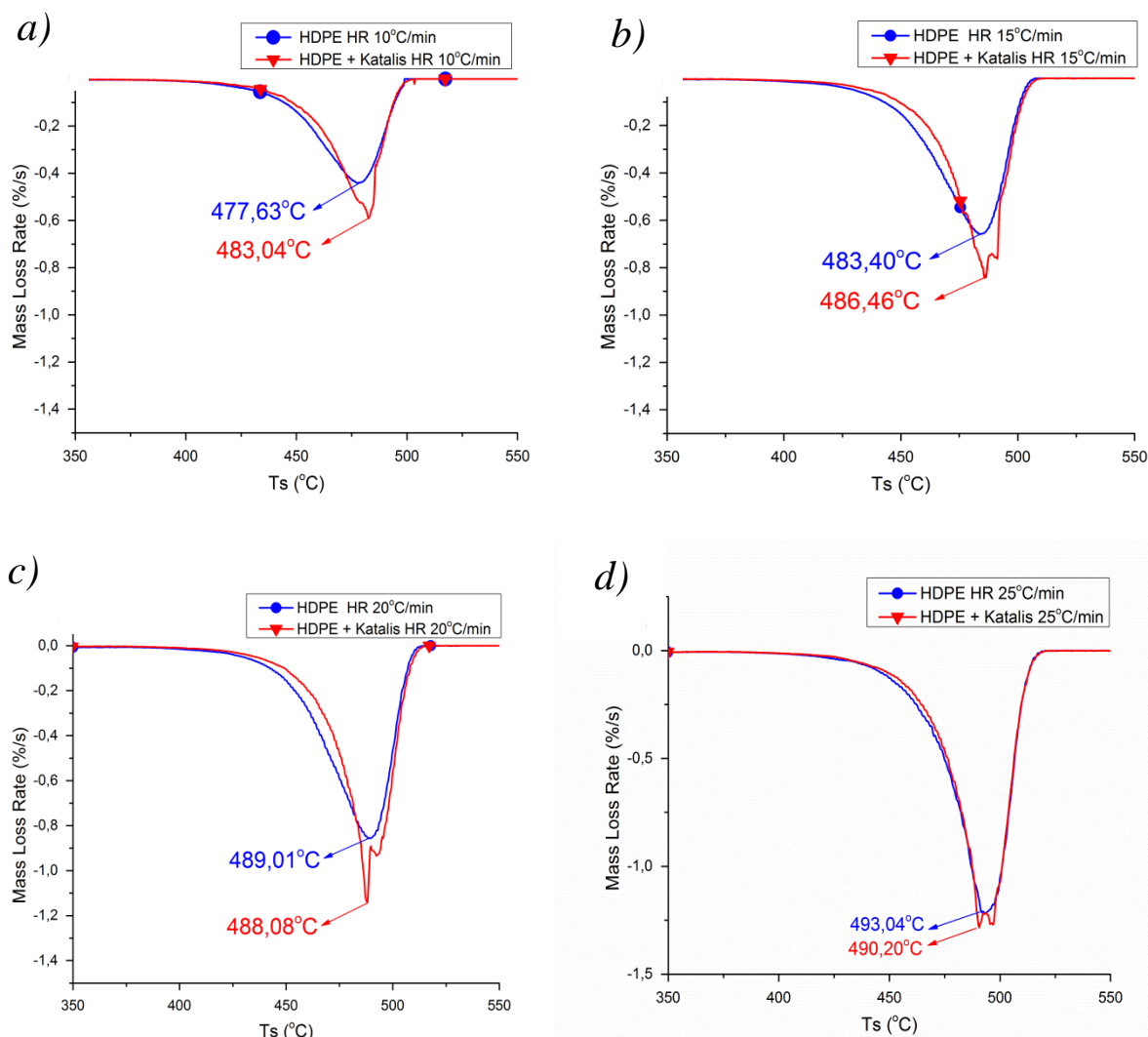
5.5.5 Perbandingan Temperatur Puncak Tahap Dekomposisi Pirolisis Sampah Plastik HDPE Tanpa dan Dengan Penambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 Pada Variasi *Heating Rate*

Data perbandingan temperatur puncak tahap dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE tanpa dan dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 ditampilkan pada Tabel 5.16 dan Gambar 5.19a-d.

Tabel 5.16

Perbandingan Temperatur Puncak Tahap Dekomposisi Pirolisis Sampah Plastik HDPE Tanpa dan Dengan Penambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 Pada Variasi Heating Rate

Temperatur Puncak Tahap Dekomposisi			
No	HR ($^\circ\text{C}/\text{min}$)	HDPE ($^\circ\text{C}$)	HDPE + Nanokatalis MnFe_2O ($^\circ\text{C}$)
1	10	477,63	483,04
2	15	483,40	486,46
3	20	489,01	488,08
4	25	493,04	490,20



Gambar 5.19 Pergeseran temperatur puncak dekomposisi proses pirolisis sampah plastik HDPE tanpa dan dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada *heating rate* (a) 10°C/min, (b) 15°C/min, (c) 20°C/min, (d) 25°C/min

Dari Tabel 5.16 dan Gambar 5.19a-d diketahui bahwa penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 menyebabkan pergeseran temperatur puncak tahap dekomposisi ke temperatur yang lebih tinggi untuk *heating rate* 10 dan 15°C/min, sebaliknya untuk *heating rate* 20 dan 25°C puncak dekomposisi bergeser ke temperatur yang lebih rendah. Hal ini terjadi karena, pada *heating rate* tinggi maka gerakan atom akan semakin semakin cepat, percepatan geraknya juga semakin tinggi, sehingga momen inersia atom tersebut juga tinggi. Yahya et al (2013) juga menyatakan bahwa peningkatan temperatur juga meningkatkan vibrasi termal atom. Dengan demikian, semakin tinggi temperatur, gerakan atom (baik gerak vibrasi, rotasi maupun translasi) akan meningkat, sehingga menyebabkan ikatan antar atom lebih cepat terputus (membutuhkan waktu yang sangat singkat untuk terputus). Karena waktu pemutusan ikatan antar atom/antar molekul polimer HDPE ini

menjadi lebih singkat sehingga menyebabkan temperatur puncak tahap dekomposisinya bergeser ke temperatur yang lebih rendah.

5.5.6 Perbandingan Residu yang Tersisa Pada Proses Pirolisis Sampah Plastik HDPE Tanpa dan Dengan Penambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 Pada Variasi *Heating Rate*

Proses pirolisis sampah plastik HDPE tanpa dan dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 menyisakan jumlah residu yang berbeda. Data perbandingan residu yang tersisa pada proses pirolisis sampah plastik HDPE tanpa dan dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada variasi *heating rate* disajikan pada Tabel 5.17.

Tabel 5.17

Perbandingan Residu yang Tersisa Pada Proses Pirolisis Sampah Plastik HDPE Tanpa dan Dengan Penambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 Pada Variasi Heating Rate

Perbandingan Massa Residu Pada Proses Pirolisis Sampah Plastik HDPE Dengan Dan Tanpa Penambahan Nanokatalis MnFe_2O_4							
No	HR	HDPE			HDPE + Nanokatalis MnFe_2O_4		
		Massa Awal (mg)	Massa Residu (mg)	Residu (wt%)	Massa Awal (mg)	Massa Residu (mg)	Residu (wt%)
1	10	10,20	0	0	6,40	0,02	0,3
2	15	7,17	0,13	2	6,53	0,23	3
3	20	8,16	0,15	2	6,18	0,33	5
4	25	7,78	0,08	1	6,47	0,25	4

Berdasarkan Tabel 5.17 diketahui bahwa residu yang tersisa pada proses pirolisis sampah plastik HDPE dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 lebih banyak daripada yang tanpa katalis. Residu ini kemungkinan berasal dari sampel yang tidak terbakar, *fixed carbon* yang tersisa setelah proses pirolisis dan membentuk arang, kandungan mineral Na yang tidak bereaksi dengan unsur lain selama proses pirolisis sehingga tersisa menjadi residu dan juga dari kadar abu yang terkandung pada sampel. Residu proses pirolisis sampah plastik HDPE yang dengan tambahan nanokatalis cenderung lebih banyak karena katalis akan terbentuk kembali di akhir proses dan tertinggal bersama residu. Karena residu yang dihasilkan pada proses pirolisis sampah plastik HDPE ini sangat sedikit sehingga untuk penanganan residunya bisa lebih hemat dan mudah.

5.6. Kinetika Pirolisis

Uji termogravimetri sampah plastik HDPE tanpa dan dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 telah dilakukan. Dari data hasil uji termogravimetri ini, selanjutnya dapat dihitung energi aktivasi pada setiap tingkat konversi dari proses pirolisis. Tahap perhitungan energi aktivasi dalam penelitian ini, dijelaskan sebagai berikut:

5.6.1 Menghitung Mass Loss (%)

$$\Delta m = \frac{m_i - m_t}{m_i} \times 100$$

dimana, Δm adalah *mass loss* (%), m_i adalah massa awal sampel (mg) dan m_t adalah massa sampel pada waktu t (s).

5.6.2 Menghitung 1/T (Kelvin/K) dan α

$$1/T = 1/K \times 10^3$$

Dimana, 10^3 adalah untuk mengkonversi nilai energi aktivasi dari J/mol ke kJ/mol, sehingga,

$$1/T = (1/(\text{Temperatur} + 273)) \times 10^3$$

$$\alpha = \frac{m_i - m_t}{m_t - m_\infty}$$

Dimana, m_i adalah massa awal sampel, m_t adalah massa sampel pada waktu t dan m_∞ adalah massa sisa dari proses reaksi. Konversi ini menyatakan jumlah sampel yang terdekomposisi.

5.6.2.1 Pirolisis Sampah Plastik HDPE Dengan *Heating Rate* 10°C/min

Pirolisis sampah plastik HDPE dengan *heating rate* 10°C/min dengan massa awal (m_i) adalah 10,1988mg dan massa akhir proses dekomposisi (m_∞) adalah 0 mg, dimana akhir dari proses dekomposisi ini terjadi pada temperatur 503,20°C. Parameter kinetik pirolisis sampah plastik HDPE pada *heating rate* 10°C/min disajikan pada Tabel 5.18.

Tabel 5.18

Parameter Kinetik pirolisis sampah plastik HDPE Dengan Heating Rate 10°C/min

<i>Heating Rate 10°C/min</i>					
<i>Time (s)</i>	<i>Temperatur (°C)</i>	<i>Mass (mg)</i>	<i>Mass Loss (%)</i>	α	<i>1/T (K)</i>
2460	436.601	9.17301	10.05794799	0.1	1.409242659
2556	452.5	8.14812	20.10707142	0.2	1.378359752
2605	460.574	7.12593	30.12972114	0.3	1.36318899
2640	466.299	6.08565	40.32974468	0.4	1.352632697
2668	470.894	5.069	50.29807428	0.5	1.344277545
2693	474.997	4.02937	60.49172452	0.6	1.336903758
2716	478.788	3.00584	70.52751304	0.7	1.330162227
2739	482.613	2.00289	80.36151312	0.8	1.323428792
2767	487.344	0.979784	90.39314429	0.9	1.315194175

5.6.2.2 Pirolisis Sampah Plastik HDPE Dengan *Heating Rate* 15°C/min

Pirolisis sampah plastik HDPE dengan *heating rate* 15°C/min dengan massa awal (m_i) adalah 7.17525 mg dan massa akhir proses dekomposisi (m_∞) adalah 0.126397 mg, dimana

akhir dari proses dekomposisi ini terjadi pada temperatur 508.30°C. Parameter kinetik pirolisis sampah plastik HDPE pada *heating rate* 15°C/min disajikan pada Tabel 5.19.

Tabel 5.19

Parameter Kinetik Pirolisis Sampah Plastik HDPE Dengan Heating Rate 15°C/min

Heating Rate 15°C/min					
Time (s)	Temperature (°C)	Mass (mg)	Mass Loss (%)	α	1/T (K)
1674	443.366	6.46964	9.833943	0.1	1.395934
1734	458.352	5.75962	19.72935	0.2	1.367331
1766	466.286	5.0495	29.62615	0.3	1.352656
1789	471.985	4.34198	39.48671	0.4	1.342309
1808	476.703	3.62847	49.43075	0.5	1.333862
1824	480.664	2.93658	59.07348	0.6	1.326851
1839	484.396	2.23809	68.80819	0.7	1.320313
1855	488.394	1.50017	79.09244	0.8	1.31338
1873	492.93	0.79943	88.85851	0.9	1.305602

5.6.2.3 Pirolisis Sampah Plastik HDPE Dengan Heating Rate 20°C/min

Pirolisis sampah plastik HDPE Dengan *heating rate* 20°C/min dengan massa awal (m_i) adalah 8.15829 mg dan massa akhir proses dekomposisi (m_∞) adalah 0.14688 mg, dimana akhir dari proses dekomposisi ini terjadi pada temperatur 515.10°C. Parameter kinetik pirolisis sampah plastik HDPE pada *heating rate* 20°C/min disajikan pada Tabel 5.20.

Tabel 5.20

Parameter Kinetik Pirolisis Sampah Plastik HDPE Dengan Heating Rate 20°C/min

Heating Rate 20°C/min					
Time (s)	Temperature (°C)	Mass (mg)	Mass Loss (%)	α	1/T (K)
1674	443.366	6.46964	9.833943	0.1	1.395934
1734	458.352	5.75962	19.72935	0.2	1.367331
1766	466.286	5.0495	29.62615	0.3	1.352656
1789	471.985	4.34198	39.48671	0.4	1.342309
1808	476.703	3.62847	49.43075	0.5	1.333862
1824	480.664	2.93658	59.07348	0.6	1.326851
1839	484.396	2.23809	68.80819	0.7	1.320313
1855	488.394	1.50017	79.09244	0.8	1.31338
1873	492.93	0.79943	88.85851	0.9	1.305602

5.6.2.4 Pirolisis Sampah Plastik HDPE Dengan Heating Rate 25°C/min

Pirolisis sampah plastik HDPE dengan *heating rate* 25°C/min dengan massa awal (m_i) adalah 7.77701 mg dan massa akhir proses dekomposisi (m_∞) adalah 0.0822364 mg, dimana akhir dari proses dekomposisi ini terjadi pada temperatur 520.20°C. Parameter kinetik pirolisis sampah plastik HDPE pada *heating rate* 25°C/min disajikan pada Tabel 5.21.

Tabel 5.21

Parameter Kinetik Pirolisis Sampah Plastik HDPE Dengan Heating Rate 25°C/min

Heating Rate 25°C/min					
Time (s)	Temperature (°C)	Mass (mg)	Mass Loss (%)	α	1/T (K)
1032	455.598	7.00496	9.92733711	0.1	1.372498964
1069	470.91	6.21808	20.0453645	0.2	1.344248632
1089	479.149	5.4266	30.2225405	0.3	1.329523804
1102	484.47	4.67903	39.8351037	0.4	1.320184298
1112	488.552	3.92799	49.4922856	0.5	1.313107969
1121	492.221	3.12363	59.835078	0.6	1.306812019
1129	495.501	2.37017	69.5233772	0.7	1.301234481
1138	499.233	1.55509	80.0040118	0.8	1.294945955
1148	503.445	0.801886	89.6890193	0.9	1.287921231

5.6.2.5 Pirolisis Sampah Plastik HDPE Dengan Tambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 Pada Heating Rate 10°C/min

Pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada *heating rate* 10°C/min dengan massa awal (m_i) adalah 6.40196 mg dan massa akhir proses dekomposisi (m_∞) adalah 0.0176062 mg, dimana akhir dari proses dekomposisi ini terjadi pada temperatur 503.30°C. Parameter kinetik pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada *heating rate* 10°C/min disajikan pada Tabel 5.22.

Tabel 5.22

Parameter Kinetik Pirolisis Sampah Plastik HDPE Dengan Tambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 Pada Heating Rate 10°C/min

Heating Rate 10°C/min					
Time (s)	Temperature (°C)	Mass (mg)	Mass Loss (%)	α	1/T (K)
3102	441.537	5.75956	10.03443	0.1	1.399508
3194	456.804	5.11697	20.07182	0.2	1.370231
3242	464.746	4.47746	30.06111	0.3	1.35548
3274	470.032	3.84811	39.89169	0.4	1.345837
3299	474.131	3.20708	49.90472	0.5	1.338453
3320	477.59	2.56012	60.01037	0.6	1.332285
3339	480.724	1.92126	69.9895	0.7	1.326746
3357	483.714	1.26519	80.23746	0.8	1.321503
3379	487.417	0.648885	89.86428	0.9	1.315068

5.6.2.6 Pirolisis Sampah Plastik HDPE Dengan Tambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 Pada Heating Rate 15°C/min

Pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada *heating rate* 10°C/min dengan massa awal (m_i) adalah 6.5334 mg dan massa akhir proses dekomposisi (m_∞) adalah 0.233634 mg, dimana akhir dari proses dekomposisi ini terjadi

pada temperatur 517.402°C. Parameter kinetik pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada *heating rate* 15°C/min disajikan pada Tabel 5.23.

Tabel 5.23

Parameter Kinetik Pirolisis Sampah Plastik HDPE Dengan Tambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 Pada Heating Rate 15°C/min

<i>Heating Rate 15°C/min</i>					
<i>Time (s)</i>	<i>Temperature (°C)</i>	<i>Mass (mg)</i>	<i>Mass Loss (%)</i>	α	<i>1/T (K)</i>
1693	448.121	5.89985	9.697095	0.1	1.38673
1756	463.785	5.26965	19.34291	0.2	1.357248
1788	471.701	4.62353	29.23241	0.3	1.342821
1808	476.623	4.00532	38.69471	0.4	1.334004
1825	480.799	3.34167	48.85251	0.5	1.326614
1838	484	2.72421	58.30333	0.6	1.321004
1850	486.95	2.08749	68.04895	0.7	1.315876
1863	490.189	1.4491	77.82012	0.8	1.310291
1878	493.99	0.850199	86.98688	0.9	1.303798

5.6.2.7 Pirolisis Sampah Plastik HDPE Dengan Tambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 Pada Heating Rate 20°C/min

Pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada *heating rate* 20°C/min dengan massa awal (m_i) adalah 6.17179 mg dan massa akhir proses dekomposisi (m_∞) adalah 0.330907 mg, dimana akhir dari proses dekomposisi ini terjadi pada temperatur 516.745°C. Parameter kinetik pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada *heating rate* 20°C/min disajikan pada Tabel 5.24.

Tabel 5.24

Parameter Kinetik Pirolisis Sampah Plastik HDPE Dengan Tambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 Pada Heating Rate 20°C/min

<i>Heating Rate 20°C/min</i>					
<i>Time (s)</i>	<i>Temperature (°C)</i>	<i>Mass (mg)</i>	<i>Mass Loss (%)</i>	α	<i>1/T (K)</i>
1289	455.151	5.58229	9.551524	0.1	1.373342
1331	469.057	4.99318	19.09673	0.2	1.347605
1354	476.627	4.39327	28.81692	0.3	1.333997
1369	481.541	3.82265	38.06254	0.4	1.325309
1381	485.47	3.22552	47.73769	0.5	1.318444
1390	488.412	2.63194	57.35532	0.6	1.313349
1400	491.699	2.05524	66.69945	0.7	1.307704
1410	495.017	1.49175	75.82954	0.8	1.302055
1423	499.384	0.883894	85.67848	0.9	1.294693

5.6.2.8 Pirolisis Sampah Plastik HDPE Dengan Tambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 Pada Heating Rate $25^\circ\text{C}/\text{min}$

Pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada heating rate $25^\circ\text{C}/\text{min}$ dengan massa awal (m_i) adalah 6.46936 mg dan massa akhir proses dekomposisi (m_∞) adalah 0.248279 mg, dimana akhir dari proses dekomposisi ini terjadi pada temperatur 520.989°C . Parameter kinetik pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 pada heating rate $25/\text{min}$ disajikan pada Tabel 5.25.

Tabel 5.25

Parameter Kinetik Pirolisis Sampah Plastik HDPE Dengan Tambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 Pada Heating Rate $25^\circ\text{C}/\text{min}$

Heating Rate $25^\circ\text{C}/\text{min}$					
Time (s)	Temperature ($^\circ\text{C}$)	Mass (mg)	Mass Loss (%)	α	1/T (K)
1038	458.105	5.84605	9.634802	0.1	1.367793
1074	473.002	5.20993	19.46761	0.2	1.340479
1092	480.408	4.60059	28.88647	0.3	1.327302
1105	485.721	3.95137	38.92178	0.4	1.318008
1115	489.81	3.28071	49.28849	0.5	1.310942
1122	492.66	2.71321	58.06061	0.6	1.306063
1130	495.953	2.07487	67.92774	0.7	1.30047
1138	499.272	1.45431	77.52003	0.8	1.294881
1148	503.48	0.834199	87.10539	0.9	1.287863

5.6.3 Menghitung Kemiringan/Slope

Setelah didapatkan data parameter kinetik dari proses pirolisis sampah plastik HDPE tanpa dan dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 , data tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung kemiringan/slope pada grafik persamaan garis lurus. Dari grafik tersebut akan diperoleh persamaan garis lurus $y = mx + c$. Dari persamaan tersebut selanjutnya akan diperoleh besarnya energi aktivasi pada setiap tingkat konversi (α). Pada penelitian ini, besarnya energi aktivasi akan dihitung menggunakan metode iso-koversional yaitu metode Flynn Wall-Ozawa (FWO) dan Vyazovkin.

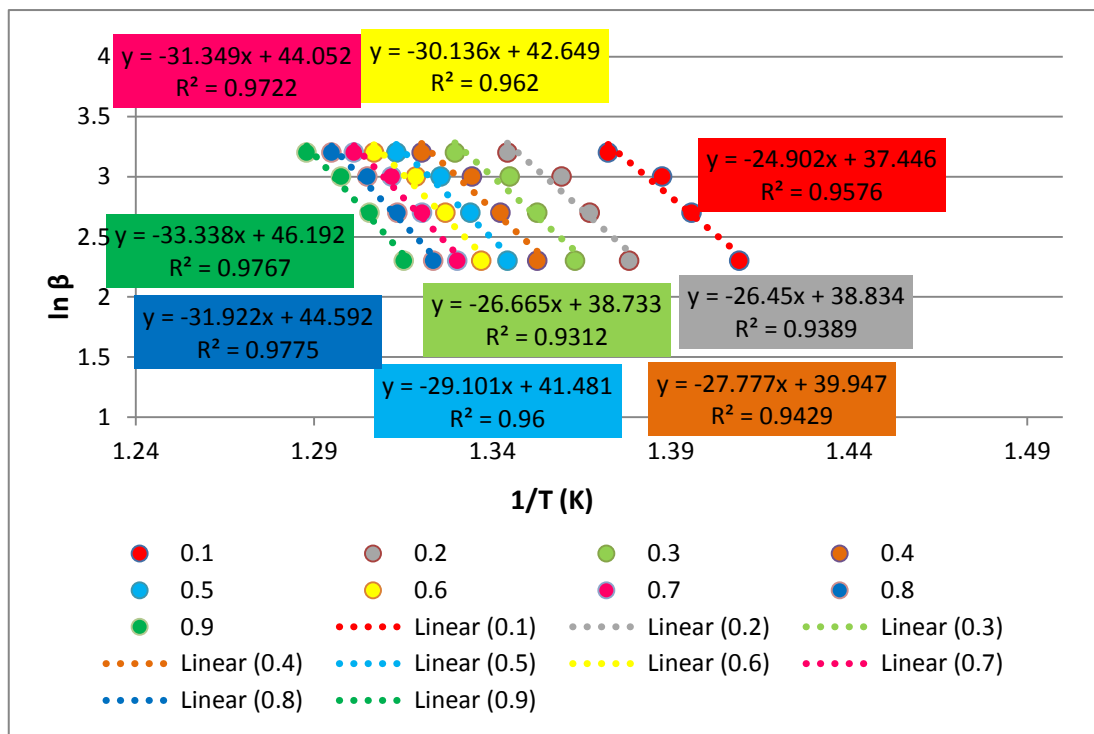
5.6.3.1 Metode Flynn Wall Ozawa (FWO)

Hasil perhitungan nilai α (tingkat konversi), β (heating rate), $\ln\beta$ dan $1/T$ pada proses pirolisis sampah plastik HDPE disajikan pada Tabel 5.26 dan Gambar 5.20. Kemudian hasil plotting antara $\ln\beta$ vs $1/T$ pada sampah plastik HDPE dengan metode FWO disajikan pada Tabel 5.27.

Tabel 5.26

Nilai α , β , $\ln\beta$ dan $1/T$ Pada Pirolisis Sampah Plastik HDPE

β	$\ln\beta$	A								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
		$1/T$ (K)								
10	2.3	1.41	1.38	1.37	1.36	1.34	1.34	1.33	1.32	1.32
15	2.7	1.40	1.37	1.35	1.34	1.33	1.33	1.32	1.31	1.31
20	3	1.39	1.36	1.34	1.33	1.32	1.32	1.31	1.30	1.30
25	3.2	1.37	1.34	1.33	1.32	1.31	1.31	1.30	1.30	1.29



Gambar 5.20 Slope dan intercept antara $\ln\beta$ vs $1/T$ pada sampah plastik HDPE

Tabel 5.27

Hasil Plotting $\ln\beta$ vs $1/T$ Pada Sampah Plastik HDPE Dengan Metode FWO

α	Intercept	Slope	R^2
0.1	37.446	-24.90159	0.9576
0.2	38.834	-26.450134	0.9389
0.3	38.733	-26.664852	0.9312
0.4	39.947	-27.776688	0.9429
0.5	41.481	-29.101262	0.96
0.6	42.649	-30.136408	0.962
0.7	44.052	-31.349306	0.9722
0.8	44.592	-31.922481	0.9775
0.9	46.192	-33.338189	0.9767

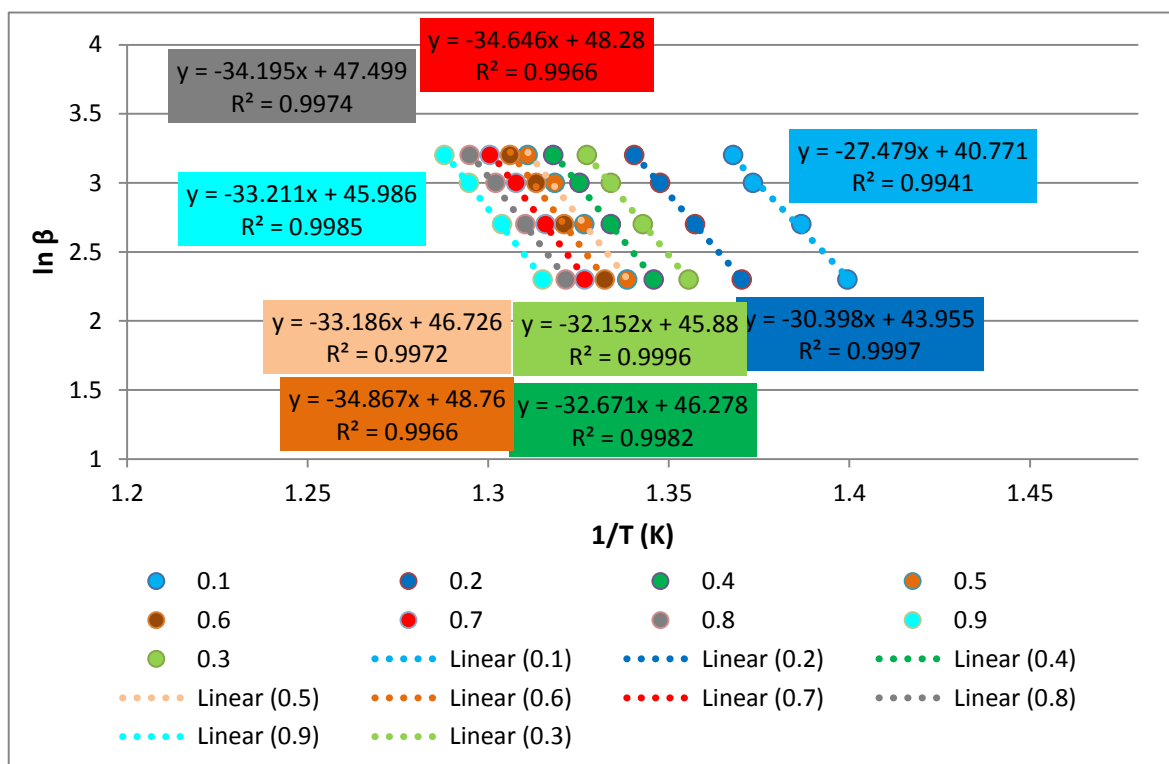
Hasil perhitungan nilai α (tingkat konversi), β (heating rate), $\ln\beta$ dan $1/T$ pada proses pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 disajikan pada

Tabel 5.28 dan Gambar 5.21. Kemudian hasil plotting antara $\ln\beta$ vs $1/T$ pada sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 dengan metode FWO disajikan pada Tabel 5.29.

Tabel 5.28

Nilai α , β , $\ln\beta$ dan $1/T$ Pada Pirolisis Sampah Plastik HDPE Dengan Tambahan Nanokatalis MnFe_2O_4

		α								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
β	$\ln\beta$	$1/T$ (K)								
10	2.3	1.40	1.37	1.35	1.34	1.34	1.33	1.33	1.32	1.31
15	2.7	1.39	1.36	1.34	1.33	1.33	1.32	1.32	1.31	1.30
20	3	1.37	1.35	1.33	1.32	1.32	1.31	1.31	1.30	1.30
25	3.2	1.37	1.34	1.33	1.32	1.31	1.31	1.30	1.30	1.29



Gambar 5.21 Slope dan intercept antara $\ln\beta$ vs $1/T$ pada sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4

Tabel 5.29

Hasil Plotting $\ln\beta$ vs $1/T$ Pada Sampah Plastik HDPE Dengan Tambahan Nanokatalis MnFe_2O_4 Dengan Metode FWO

α	Intercept	Slope	R^2
0.1	40.771	-27.47884213	0.9941
0.2	43.955	-30.39782349	0.9997
0.3	45.88	-32.15177643	0.9996
0.4	46.278	-32.67062276	0.9982
0.5	46.726	-33.1864796	0.9972
0.6	48.76	-34.86660736	0.9966
0.7	48.28	-34.64642547	0.9966
0.8	47.499	-34.19525909	0.9974
0.9	45.986	-33.21067429	0.9985

5.6.3.2 Metode Vyazovkin

Pada metode vyazovkin, parameter yang digunakan dalam menghitung kemiringan/slope adalah $\ln(\beta/T^2)$ dan $1/T$. Nilai α , β , $\ln\beta$, $1/T$ dan $\ln(\beta/T^2)$ dari sampah plastik HDPE tanpa dan dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 masing-masing disajikan pada Tabel 5.30 dan 5.31.

Tabel 5.30

Nilai α , β , $\ln\beta$, $1/T$ dan $\ln(\beta/T^2)$ Sampah Plastik HDPE

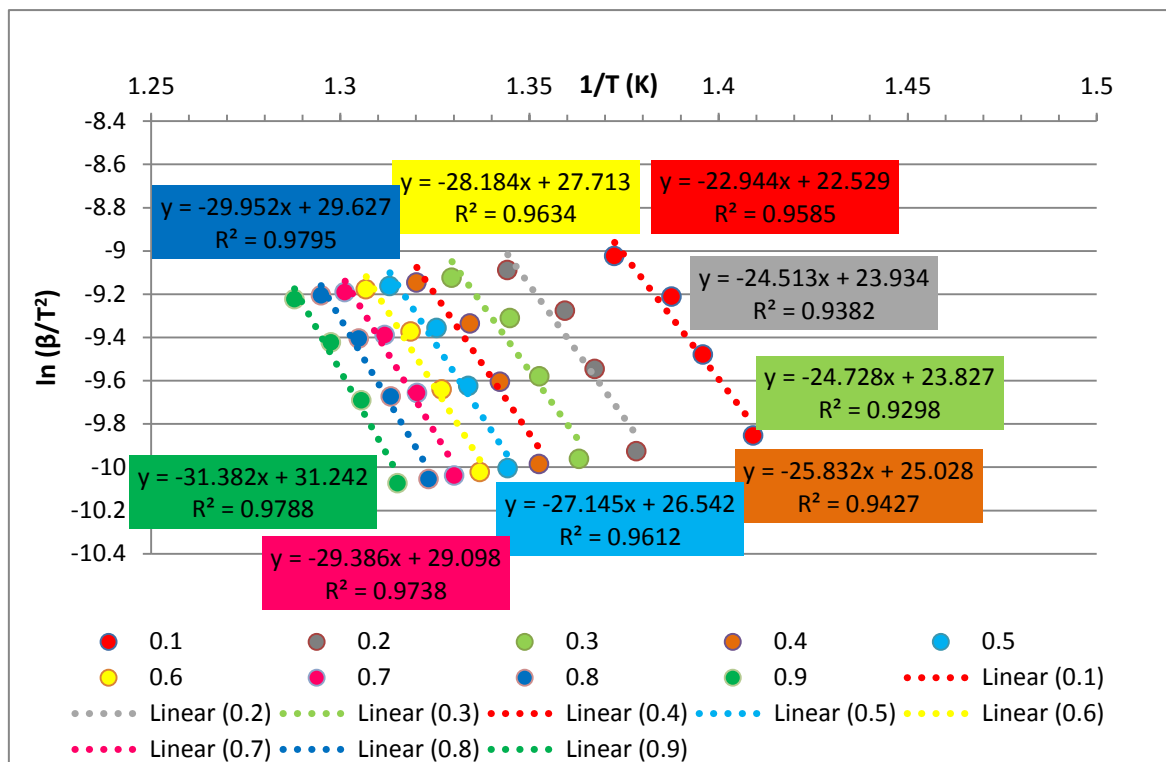
Table 3. β , $\ln \beta$, $1/T$ and $\ln (\beta/T^2)$ against T for the ADPE										
β	$\ln \beta$	α								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
		$1/T$								
10	2.3	1.41	1.38	1.37	1.36	1.34	1.34	1.33	1.32	1.32
15	2.7	1.40	1.37	1.35	1.34	1.33	1.33	1.32	1.31	1.31
20	3	1.39	1.36	1.34	1.33	1.32	1.32	1.31	1.30	1.30
30	3.2	1.37	1.34	1.33	1.32	1.31	1.31	1.30	1.30	1.29
β	$\ln \beta$	α								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
		$\ln (\beta/T^2)$								
10	2.3	-9.85	-9.93	-9.96	-9.98	-10.01	-10.02	-10.04	-10.06	-10.07
15	2.7	-9.48	-9.55	-9.58	-9.60	-9.63	-9.64	-9.66	-9.67	-9.70
20	3	-9.21	-9.28	-9.31	-9.34	-9.358	-9.37	-9.39	-9.41	-9.42
30	3.2	-9.02	-9.09	-9.12	-9.15	-9.16	-9.18	-9.19	-9.21	-9.22

Tabel 5.31

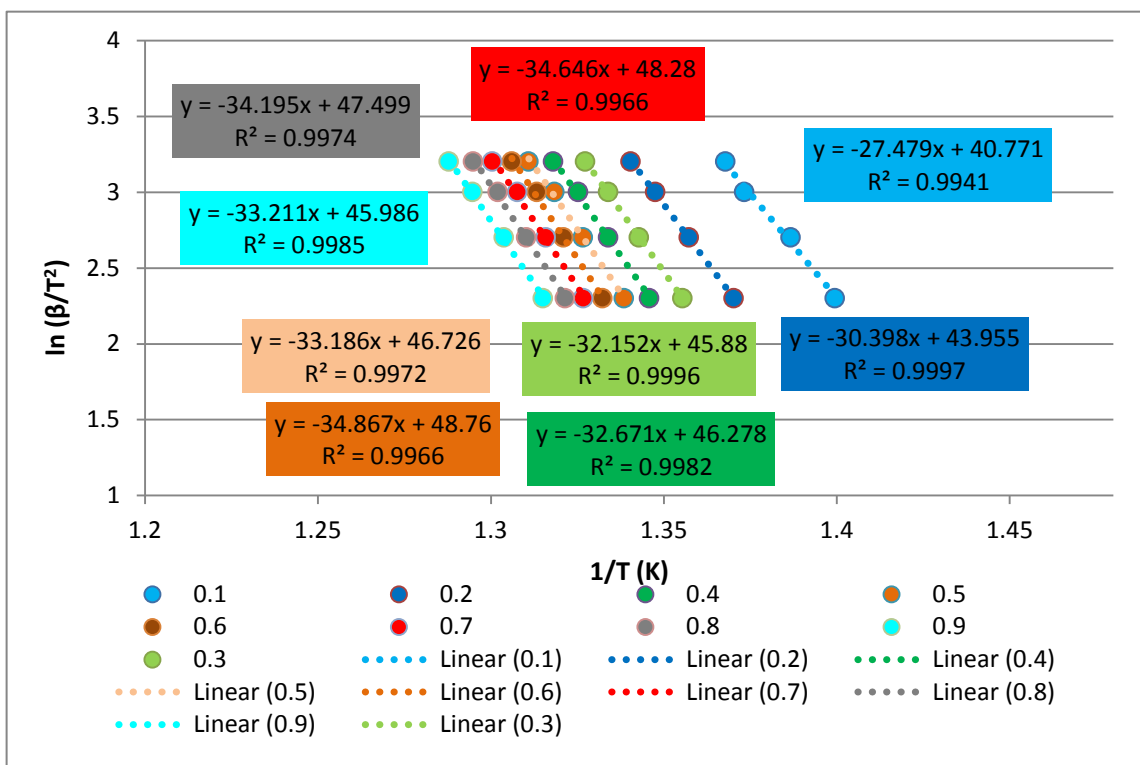
Nilai α , β , $\ln \beta$, $1/T$ dan $\ln (\beta/T^2)$ Sampah Plastik HDPE Dengan Tambahan Nanokatalis MnFe_2O_4

		α								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
β	$\ln\beta$	$1/T$								
10	2.3	1.40	1.37	1.35	1.34	1.34	1.33	1.33	1.32	1.31
15	2.7	1.39	1.36	1.34	1.33	1.33	1.32	1.32	1.31	1.30
20	3	1.37	1.35	1.33	1.32	1.32	1.31	1.31	1.30	1.30
30	3.2	1.37	1.34	1.33	1.32	1.31	1.31	1.30	1.30	1.29
		α								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
β	$\ln\beta$	$\ln (\beta/T^2)$								
10	2.3	-9.88	-9.95	-9.98	-10.00	-10.02	-10.03	-10.05	-10.06	-10.08
15	2.7	-9.50	-9.57	-9.60	-9.62	-9.64	-9.66	-9.67	-9.68	-9.70
20	3	-9.25	-9.31	-9.34	-9.36	-9.37	-9.39	-9.40	-9.41	-9.43
30	3.2	-9.03	-9.10	-9.13	-9.15	-9.17	-9.18	-9.19	-9.21	-9.22

Slope dan intercept antara $\ln(\beta/T^2)$ dan $1/T$ dari sampah plastik HDPE tanpa dan dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 5.22 dan 5.23. Sedangkan hasil plotting antara $\ln (\beta/T^2)$ vs $1/T$ pada sampah plastik HDPE tanpa dan dengan penambahan nanokatalis MnFe_2O_4 dengan metode Vyazovkin masing-masing ditampilkan pada Tabel 5.32 dan 5.33.



Gambar 5.22 Slope dan intercept antara $\ln (\beta/T^2)$ dan $1/T$ pada sampah plastik HDPE



Gambar 5.23 Slope dan intercept antara $\ln(\beta/T^2)$ dan $1/T$ pada sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe₂O₄

Tabel 5.32

Hasil Plotting $\ln(\beta/T^2)$ vs $1/T$ Pada Sampah Plastik HDPE Dengan Metode Vyazovkin

α	Intercept	Slope	R^2
0.1	22.529279	-22.94391427	0.9585
0.2	23.933782	-24.51255959	0.9382
0.3	23.827073	-24.72762391	0.9298
0.4	25.027691	-25.83232394	0.9427
0.5	26.542163	-27.14474271	0.9612
0.6	27.713221	-28.18423772	0.9634
0.7	29.097887	-29.38586312	0.9738
0.8	29.627026	-29.95247964	0.9795
0.9	31.241916	-31.38210089	0.9788

Tabel 5.33

Hasil plotting $\ln(\beta/T^2)$ vs $1/T$ Pada Sampah Plastik HDPE Dengan Tambahan Nanokatalis $MnFe_2O_4$ Dengan Metode Vyazovkin

α	<i>Intercept</i>	<i>Slope</i>	R^2
0.1	25.67469	-25.3935582	0.9941
0.2	28.93116	-28.37126675	0.9997
0.3	30.86329	-30.13402617	0.9996
0.4	31.27668	-30.66709715	0.9982
0.5	31.73534	-31.19269575	0.9972
0.6	33.79272	-32.8919218	0.9966
0.7	33.29422	-32.65928807	0.9966
0.8	32.49419	-32.19511631	0.9974
0.9	30.93484	-31.17748148	0.9985

5.7 Menghitung Energi Aktivasi

Data parameter kinetik dari proses pirolisis sampah plastik HDPE tanpa dan dengan penambahan nanokatalis $MnFe_2O_4$ telah didapatkan dan selanjutnya bisa dihitung energi aktivasinya.

5.7.1 Metode Flynn Wall-Ozawa (FWO)

Rumus untuk menghitung energi aktivasi dengan metode FWO adalah sebagai berikut:

$$\ln\beta = \ln \left[\frac{0.0048AE}{R \cdot g(\alpha)} \right] - 1.0516 \frac{E}{R} \frac{1}{T}$$

Dimana, R adalah tetapan gas, $g(\alpha)$ adalah integral fungsi kinetika atau integral model reaksi dalam definisi matematis dan E adalah energi aktivasi.

Dan persamaan garis lurus :

$$y = mx + c$$

dimana,

$$y = \ln\beta \quad mx = -1.0516 \frac{E}{RT} \quad c = \ln \left[\frac{0.0048AE}{Rg(\alpha)} \right] \quad E = (R \cdot \text{slope}) / 1.0516$$

Data persamaan garis lurus yang didapatkan saat menghitung *slope*/kemiringan garis selanjutnya dapat digunakan untuk menghitung energi aktivasi pada masing-masing tingkat konversi (α) pada proses pirolisis sampah plastik HDPE tanpa dan dengan penambahan nanokatalis $MnFe_2O_4$ dan disajikan pada Tabel 5.34 dan 5.35.

Tabel 5.34

Nilai energi aktivasi pada masing-masing α proses pirolisis sampah plastik HDPE dengan metode FWO

α	<i>Intercept</i>	<i>Slope</i>	R^2	E (kJ/mol)
0.1	37.446	-24.90159	0.9576	196.87
0.2	38.834	-26.450134	0.9389	209.12
0.3	38.733	-26.664852	0.9312	210.81
0.4	39.947	-27.776688	0.9429	219.60
0.5	41.481	-29.101262	0.96	230.07
0.6	42.649	-30.136408	0.962	238.26
0.7	44.052	-31.349306	0.9722	247.85
0.8	44.592	-31.922481	0.9775	252.38
0.9	46.192	-33.338189	0.9767	263.57
Rata-rata				229.84

Tabel 5.35

Nilai energi aktivasi pada masing-masing α proses pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis $MnFe_2O_4$ dengan metode FWO

α	<i>Intercept</i>	<i>Slope</i>	R^2	E (kJ/mol)
0.1	40.771	-27.47884213	0.9941	217.25
0.2	43.955	-30.39782349	0.9997	240.36
0.3	45.88	-32.15177643	0.9996	254.19
0.4	46.278	-32.67062276	0.9982	258.29
0.5	46.726	-33.1864796	0.9972	262.37
0.6	48.76	-34.86660736	0.9966	275.66
0.7	48.28	-34.64642547	0.9966	273.92
0.8	47.499	-34.19525909	0.9974	270.35
0.9	45.986	-33.21067429	0.9985	262.56
Rata-rata				257.21

5.7.2 Metode Vyazovkin

Rumus untuk menghitung energ aktivasi dengan metode Vyazovkin adalah sebagai berikut :

$$\ln \frac{\beta}{T_2} = \ln \left[\frac{RA}{E \cdot g(\alpha)} \right] - \frac{E}{R} \frac{1}{T}$$

Dimana, R adalah tetapan gas, $g(\alpha)$ adalah integral fungsi kinetika atau integral model reaksi dalam definisi matematis dan E adalah energi aktivasi.

Dan persamaan garis lurus :

$$y = mx + c$$

dimana,

$$y = \ln \beta, \quad mx = -\frac{E}{R} \frac{1}{T} \quad c = \ln \left[\frac{RA}{E \cdot g(\alpha)} \right], \text{ maka } E = (R \cdot \text{slope})$$

Hasil perhitungan energi aktivasi proses pirolisis sampah plastik HDPE tanpa dan dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 dengan metode Vyazovkin ditampilkan pada Tabel 5.36 dan 5.37.

Tabel 5.36

Nilai energi aktivasi pada masing-masing tingkat konversi (α) pada proses pirolisis sampah plastik HDPE dengan metode Vyazovkin

α	<i>Intercept</i>	<i>Slope</i>	R^2	E (kJ/mol)
0.1	22.529279	-22.94391427	0.9585	190.76
0.2	23.933782	-24.51255959	0.9382	203.80
0.3	23.827073	-24.72762391	0.9298	205.59
0.4	25.027691	-25.83232394	0.9427	214.77
0.5	26.542163	-27.14474271	0.9612	225.68
0.6	27.713221	-28.18423772	0.9634	234.32
0.7	29.097887	-29.38586312	0.9738	244.31
0.8	29.627026	-29.95247964	0.9795	249.02
0.9	31.241916	-31.38210089	0.9788	260.91
Rata-rata				225.46

Tabel 5.37

Nilai energi aktivasi pada masing-masing tingkat konversi (α) pada proses pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 dengan metode Vyazovkin

α	<i>Intercept</i>	<i>Slope</i>	R^2	E (kJ/mol)
0.1	25.67469	-25.3935582	0.9941	211.12
0.2	28.93116	-28.37126675	0.9997	235.88
0.3	30.86329	-30.13402617	0.9996	250.53
0.4	31.27668	-30.66709715	0.9982	254.97
0.5	31.73534	-31.19269575	0.9972	259.34
0.6	33.79272	-32.8919218	0.9966	273.46
0.7	33.29422	-32.65928807	0.9966	271.53
0.8	32.49419	-32.19511631	0.9974	267.67
0.9	30.93484	-31.17748148	0.9985	259.21
Rata-rata				253.74

Berdasarkan hasil perhitungan nilai energi aktivasi yang telah didapatkan, diketahui bahwa nilai energi aktivasi yang dihitung dengan metode FWO berbeda dengan nilai energi aktivasi yang dihitung dengan metode vyazovkin. Hal ini terjadi karena nilai energi aktivasi dipengaruhi oleh berbagai faktor antara lain *heating rate* (laju pemanasan), jenis biomassa, ukuran partikel sampel, jenis TGA dan model model kinetika yang digunakan (Ma et al. 2015).

Hasil perhitungan energi aktivasi kedua metode juga menunjukkan bahwa energi aktivasi pada proses pirolisis sampah plastik HDPE yang dengan tambahan nanokatalis

MnFe_2O_4 lebih tinggi daripada yang tanpa tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 . Ini berarti, proses pirolisis sampah plastik HDPE dengan tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 membutuhkan energi yang lebih besar untuk memulai reaksi daripada proses pirolisis sampah plastik HDPE tanpa tambahan nanokatalis. Hal ini terjadi karena panas yang seharusnya langsung digunakan untuk memulai reaksi pirolisis/mulai untuk memutuskan ikatan antar molekul HDPE diserap dulu oleh MnFe_2O_4 untuk merubah struktur kristal MnFe_2O_4 yaitu perubahan distribusi kation Mn pada sisi tetrahedral dan oktahedral dan proses ini terjadi pada kisaran temperatur 300°C (Aijun et al. 2011) dan pada kondisi tersebut lattice MnFe_2O_4 berada pada kondisi metastabil (Bonsdorf et al. 1997). Selanjutnya, saat kondisi katalis sudah stabil dan panas yang diserap sudah cukup untuk mengaktifkan katalis maka panas akan langsung diserap oleh sampel untuk memutuskan ikatan polimer sampel. Lebih dari itu, dibantu dengan peran katalis tersebut menyebabkan pemutusan ikatan antar molekul sampel menjadi lebih cepat ditunjukkan dengan laju penyusutan massa maksimal yang lebih tinggi daripada sampah plastik HDPE tanpa tambahan nanokatalis MnFe_2O_4 .

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

1.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini yaitu:

1. Nanokatalis MnFe_2O_4 mempercepat laju penyusutan massa proses pirolisis sampah plastik HDPE hanya sampai di bawah batas kestabilan termalnya. Ketika nanokatalis MnFe_2O_4 sudah mendekati dan memasuki batas kestabilan termalnya, maka performa katalitiknya semakin melemah sehingga tidak banyak membantu pada proses pirolisis sampah plastik HDPE.
2. Pada *heating rate* rendah yaitu $10^\circ\text{C}/\text{min}$, $15^\circ\text{C}/\text{min}$ dan $20^\circ\text{C}/\text{min}$, nanokatalis MnFe_2O_4 menunjukkan performa katalitik yang baik yaitu meningkatkan laju penyusutan massa pada proses pirolisis sampah plastik HDPE. Tetapi pada *heating rate* yang lebih tinggi lagi yaitu $25^\circ\text{C}/\text{min}$, nanokatalis MnFe_2O_4 tidak banyak membantu pada proses pirolisis sampah plastik HDPE. Hal ini karena pada *heating rate* tinggi, peningkatan energi dan entropi dari nanokatalis MnFe_2O_4 terjadi terlalu cepat sehingga menyebabkan kerusakan kristalinitas nanokatalis MnFe_2O_4 , sehingga nanokatalis MnFe_2O_4 menjadi rusak dan tidak bisa melakukan kinerja katalitik lagi. Lebih dari itu, pada *heating rate* $25^\circ\text{C}/\text{min}$ proses dekomposisi pirolisis sampah plastik HDPE masih terjadi hingga temperatur 520°C dimana temperatur ini sangat mendekati temperatur maksimal kestabilan nanokatalis MnFe_2O_4 . Sehingga kemungkinan pada temperatur ini performa katalitik nanokatalis MnFe_2O_4 sudah melemah dan mungkin struktur katalisnya sudah hampir rusak, sehingga tidak banyak membantu pada proses pirolisis sampah plastik HDPE.

6.2 Saran

Berikut beberapa saran bagi peneliti selanjutnya yang ingin melakukan penelitian sejenis:

1. Perlu dilakukan pengujian TG dengan jumlah sampel yang besar untuk masing-masing sampel, sehingga residu yang tersisa lebih banyak dan dapat dilakukan pengujian-pengujian terhadap residu tersebut seperti uji FTIR, XRD atau XRF.

2. Perlu dilakukan proses pirolisis sampah plastik HDPE dengan peralatan pirolisis yang sesungguhnya untuk memproduksi minyak, kemudian hasil minyak tersebut diuji untuk mengetahui kandungan dari minyak tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

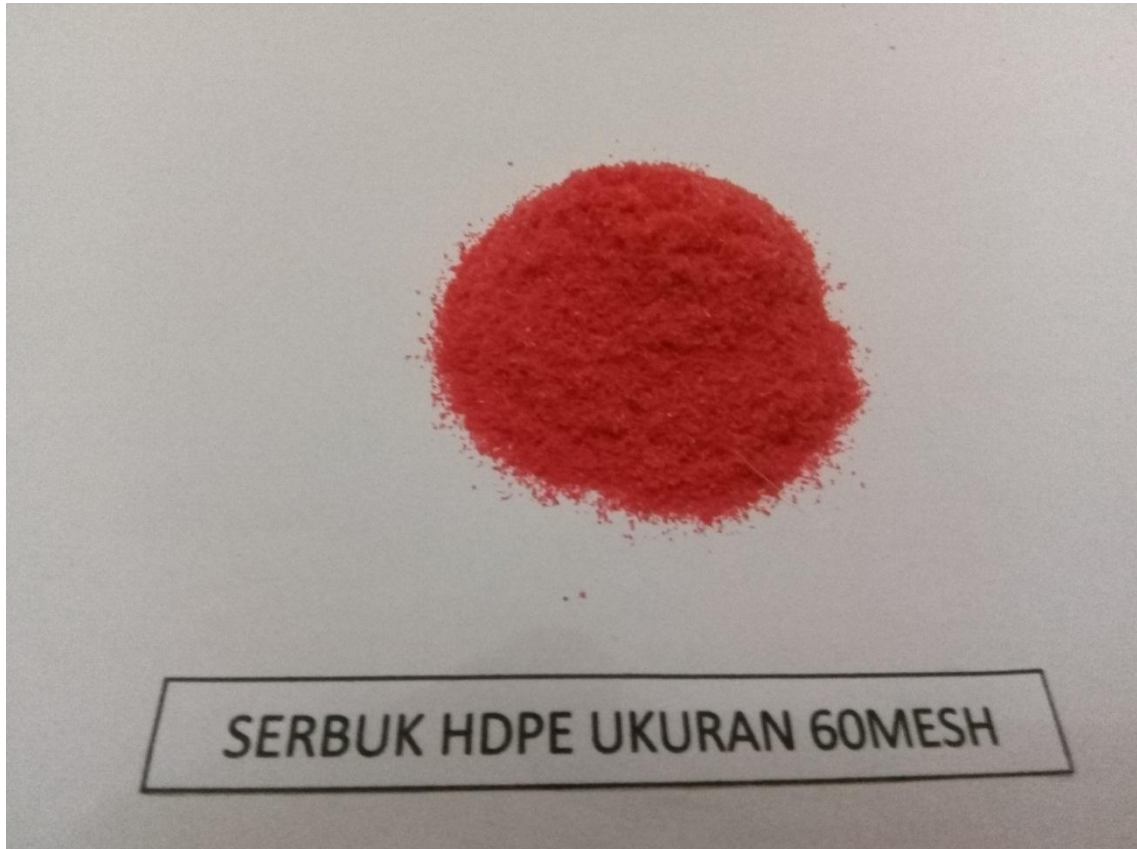
- Aijun, H., Juanjuan, L., Mingquan, Y., Yan, L., Xinhua, P. (2011). Preparation of Nano-MnFe₂O₄ and Its Catalytic Performance of Thermal Decomposition of Ammonium Perchlorate. *Journal Product Engineering and Chemical Technology, Chinese Journal of Chemical Engineering*, 19(6):1047-1051.
- Al-Saleem, S.M., Antaleva, A., Constantinou, A, Manos, G., Dutta, A. (2017). A Review on Thermal and Catalytic Pyrolysis of Plastic Solid Waste. *Journal of Environmental Management* 197(2017):177-198.
- Al-Saleem, L.M. & Lettieri, P. 2010. Kinetic Study of High Density Polyethylene (HDPE) Pyrolysis. *Journal Chemical Engineering Research and Design* 88 (2010):1599-1606.
- Billah, M. 2010. Peningkatan nilai kalor batubara peringkat rendah dengan menggunakan minyak tanah dan minyak residu. Surabaya: UPN Press.
- Bonsdorf, G., Denecke, M. A., Schafer, K., Christen, S., Langbein, C., Gunber, W. 1997. X-ray Absorption Spectroscopic and Mossbauer Studies of Redox And Cation Ordering Processes in Manganese Ferrite. *Journal Solid State Ionics* 101-103 (1997):351-357.
- British Petroleum. 2017. *World Reserves of Fossil Fuels*. .
<https://knoema.com/infographics/smsfgud/bp-world-reserves-of-fossil-fuels>. (diakses 11 Februari 2018).
- Cao, G. (2004). *Nanostructure & Nanomaterials Synthesis, Properties & Application*. London: Imperial College Press.
- Chorkendorff, I. & Niemantsverdriet, J. W. (2007). *Concepts of Modern Catalysis and Kinetics, Second Edition*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA, Weinheim.
- Guo, L., Zhai, M., Wang, Z., Zhang, Y., Dong, P. 2018. Comparison of Bituminous Coal and Lignite During Combustion: Combustion Performance, Coking and Slagging Characteristics. *Journal of the Energy Institute* xxx (2018): 1-11.
- Fang, S., Yu, Z., Li, Y., Lin, Y., Fan, Y., Liao, Y., Ma, X. (2016). Effects of Additives on the Co-Pyrolysis of Municipal Solid Waste and Paper Sludge by Using Thermogravimetric Analysis. *Journal Bioresource Thecnology* 209 (2016):265-272.
- Idris, S. S., Rahman, N. A., Ismail, K. (2012). Combustion Characteristics of Malaysian Oil Palm Biomass, Sub-bituminous Coal and Their Respective Blends via Thermogravimetric Analysis. *Journal Bioresource Technology* 123 (2012):581-591.

- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Theodore, R. S., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., Law, K. L. 2015. Plastics Waste Inputs From Land into The Ocean. *Scienmag.org* (2015) Vol 347 Issue 6223.
- Jiao, Z., Yu-qi, J., Yong, C., Jun-ming, Wen., Xu-guang, J., Ming-jiang, N. 2009. Pyrolysis Characteristics of Organic Components of Municipal Solid Waste at High Heating Rate. *Journal Waste Management* 29 (200):1089-1094.
- Kitagawa, T. (1937). The Relationship Between The Magnetic Moment of a Metal Atom and Its Catalytic Activity. *The Review of Physical Chemistry of Japan*: Vol.11f, No. 2.
- Levine, S. E., Broadbelt, L. J. (2009). Detailed Mechanistic Modeling of High Density Polyethylene Pyrolysis: Low Molecular Weight Product Evolution. *Journal Polymer Degradation and Stability* 94 (2009):810–822.
- Liu, G., Liao, Y., Guo. S., Ma, X., Zeng, C., Wu, J. 2016. Thermal Behaviour and Kinetics of Municipal Solid Waste During Pyrolysis and Combustion Process. *Journal Applied Thermal Engineering* 98 (2016):400-408.
- Lopez, R., Fernandez, C., Gomez, X., Martinez, O., Sanchez, M. E. 2012. Thermogravimetric Analysis of Lignocellulosic and Microalgae Biomass and Their Blends During Combustion. *J Therm Anal Calorim*.
- Ma, Z., Chen, D., Gu, J., Bao, B. Zhang, Q. 2015. Determination of pyrolysis characteristics and kinetics of palm kernel shell using TGA-FTIR and model-free integral methods. *Journal : Energy Conversion and Management*, 89: 251-259.
- Mujiarto, S. & Suprianto, T. (2012). Pengaruh Heating Rate Proses Pirolisis Terhadap Karakteristik Pembakaran Briket Char Bambu. *Jurnal Poros Teknik*, Volume 4, No. 2, Desember 2012:77-80.
- Otero, M., Calvo, L.F., Gil, M.V., Garcia, A.I., Morfan, A. (2008). Co-combustion of Different Sewage Sludge and Coal: A non-isothermal Thermogravimetric Kinetic Analysis. *Journal Bioresource Tecchnology* 99 (2008):6311-6319.
- Sharuddin, S. D. A., Daud, W. M. A. W., Aroua, M. K. (2016). A Review On Pyrolysis Of Plastic Wastes. *Journal Energy Conversion and Management* 115 (2016):308-326.
- Singh, D. J., Gupta, M., Gupta, R. (2008). *Magnetism and Electronic Structure in ZnFe₂O₄ and MnFe₂O₄*. 1-3.
- Sorum, L., Gronli, M. G., Hustad, J. E. 2011. Pyrolysis Characteristics and Kineticsof Municipal Solid Waste. *Journal Fuel* 80 (2001):1217-1227.
- Sugiyarto, K. H. 2004. *Kimia Anorganik, Common Textbook (Edisi Revisi)*. jiCA: Yogyakarta.

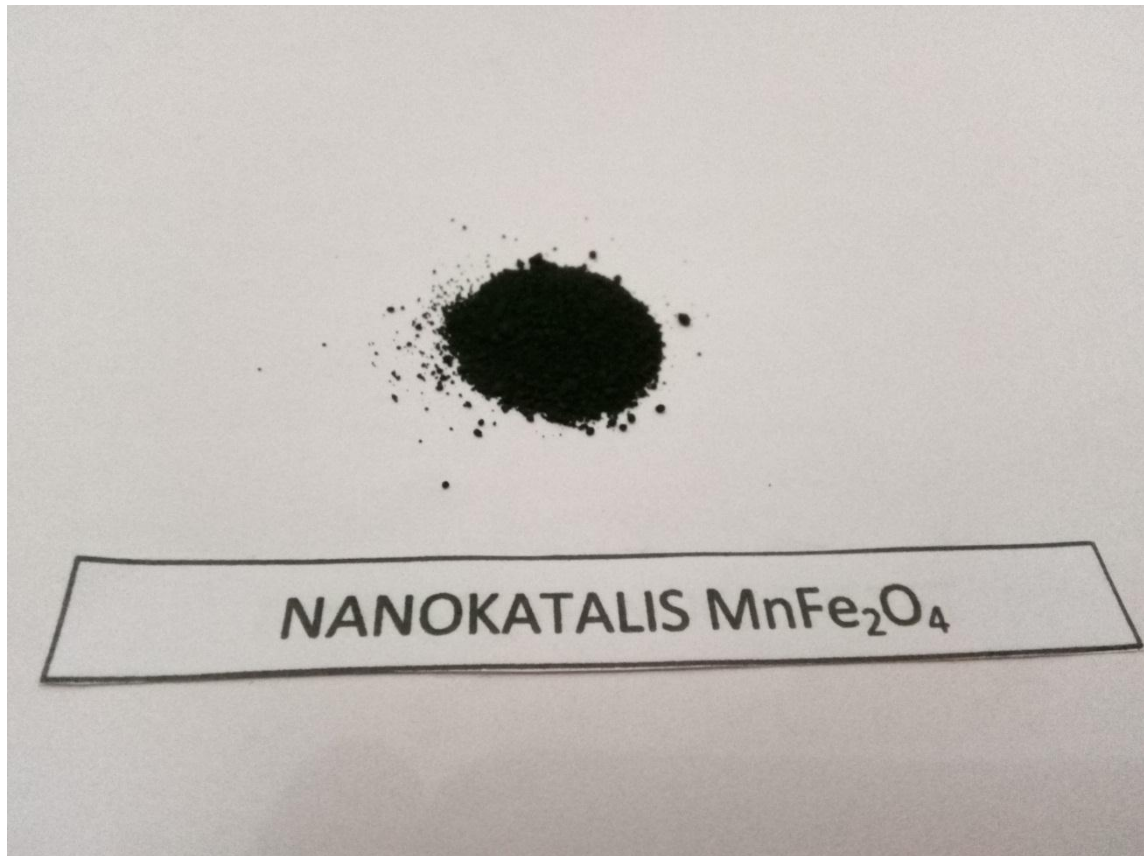
- Sukarni. 2014. *Karakteristik Mikroalga Laut Nannochloropsis oculata sebagai Alternatif Bahan Bakar Terbarukan*. Malang: Universitas Brawijaya.
- Sukarni, Sudjito, Hamidi, N., Yanuhar, U., Wardana, I. N. G. 2014. Potential and Properties of Marine Microalgae Nannochloropsis oculata as Biomass Fuel Feedstock. *Int J Energy Environ Eng.* (2014) 5:279-290.
- Sukarni, Sumarli, Puspitasari, P., Suryanto, H., Wati, R. F. 2017. Physicochemical Characteristics of Various Inorganic Combustible Solid Waste (ICSW) Mixed as Sustainable Solid Fuel. *AIP Conference Proceeding*.
- Vankatesh, G., Reddy, P. R., Kotari, S. 2016. Generation of Producer Gas Using Coconut Shells and Sugar Cane Bagasse in Updraft Gasifier. *Materials Today: Proceedings 4* (2017):9203-9209.
- Van Loo, S. & Koppejan, J. 2008. *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. UK & USA: Earthscan.
- Wardana, I. N.G. (2008). *Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran*. Malang: Brawijaya University Press.
- Wati, R. F. 2015. *Analisis Potensi Sampah Padat Anorganik Combustible Kota Malang Sebagai Alternatif Bahan Bakar Ditinjau Dari Sifat Fisik, Sifat Kimia, Nilai Kalor dan Dekomposisi Pembakaran*. Malang: Universitas Negeri Malang.
- Yahya, N., Puspitasari, P., Noordin, N. H. 2013. Ammonia Synthesis Using Magnetically Induced Reaction. *Defect and Diffusion Forum Vols. 334-335*:pp 329-336.
- Yang, Y., Liu, J., Zhang, B., Liu, F., (2016). Mechanistic Studies of Mercury Adsorption and Oxidation by Oxygen Over Spinel-Type MnFe_2O_4 . *Journal of Hazardous Materials* 321 (2017):154-161.
- Zevenhoven, R., Karlsson, M., Hupa, M., Frankenhaeuser, M. 2011. Combustion And Gasification Properties of Plastics Particles. *Journal of The Air & Waste Management Association*. ISSN: 1096-2247:2162-2906.
- Zhao, B., O'connor, D., Zhang, J., Peng, T., Shen, Z., Tsang, D. C. W., Hou, D. 2018. Effect of Pyrolysis Temperature, Heating Rate and Residence Time on Rapeseed Stem Derived Biochar. *Journal of Cleaner Production* 174(2018):977-987.
- Zheng-jian. L., Shan, R., Jian-Liang, Z., Wei-Jian, L., Xiang-dong, X., Bu-xin, S. (2012). Investigation on Co-Combustion Kinetics of Anthracite and Waste Plastics by Thermogravimetric Analysis. *Journal of Iron and Steel Research International* 19(10),pp.30-35.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Serbuk sampah plastik HDPE ukuran 60mesh yang digunakan sebagai material dalam penelitian ini



Lampiran 2. Nanokatalis MnFe_2O_4 dalam bentuk serbuk dengan ukuran 60,093nm yang digunakan sebagai katalis dalam penelitian ini



Lampiran 3. Surat keterangan uji proksimat sampah plastik HDPE



KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI, DAN PENDIDIKAN TINGGI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
 LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT
 Gedung Pusat Riset, Lantai Lobby, Kampus ITS Sukolilo - Surabaya 60111
 Telp : 031 - 5953759, Fax : 031 - 5955793, PABX : 1404, 1405
<http://www.lppm.its.ac.id>

138

SURAT KETERANGAN

No 043806 /IT2.VII /TU.00.08/2017

Yang bertanda tangan di bawah ini menerangkan bahwa pengujian contoh telah dilakukan oleh Laboratorium Energi dan Lingkungan – LPPM ITS (Jl.Teknik Kimia, Gedung LPPM lt.2 & Jl. Teknik Kimia Gedung Robotika lt.2 Kampus ITS Sukolilo Surabaya 60111) dengan rincian sebagai berikut:

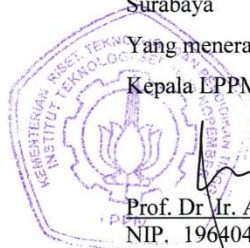
- | | | |
|----------------------------------|---|------------------------|
| 1. Nama Pelanggan | : | Rita Fadjar Wati, S.pd |
| 2. Alamat Pelanggan | : | Univ Brawiiaaya |
| 3. Kegiatan Pengujian | : | |
| a. Contoh diterima tanggal | : | 29 Mei 2017 |
| b. Contoh diuji tanggal | : | 26 Juli 2017 |
| c. Contoh selesai diuji tanggal | : | 28 Juli 2017 |
| d. Jumlah dan jenis yang diuji | : | 01(satu) / Terlampir |
| e. Standar Metode yang digunakan | : | Terlampir |
| f. Laporan Hasil Pengujian | : | Terlampir |

Demikian surat keterangan ini dibuat untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Surabaya

Yang menerangkan,

Kepala LPPM



Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT
 NIP. 19640405 199002 1 001

Lampiran 4. Surat keterangan hasil uji proksimat sampah plastik HDPE



KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI, DAN PENDIDIKAN TINGGI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
LEMBAGA PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT
 Gedung Pusat Riset, Lantai Lobby, Kampus ITS Sukolilo - Surabaya 60111
 Telp : 031 - 5953759, Fax : 031 - 5955793, PABX : 1404, 1405
<http://www.lppm.its.ac.id>

LAPORAN HASIL PENGUJIAN

Nama Pemilik : Rita Fadjar Wati, S.pd
 Alamat Pemilik : Univ Brawijaya
 Nama Contoh : **Plastik HDPE** Tanggal Terima : 29 Mei 2017
 Deskripsi : Bentuk : ~~Padat~~/Cair/Gas Tanggal Pengujian : 26 Juli 2017
 Contoh Volume : - Tanggal Selesai :
 Kemasan : botol Pengujian : 28 Juli 2017
 Kode Contoh : **EI-337** Jumlah Contoh : 1

Menyatakan bahwa contoh tersebut di atas telah diuji di Laboratorium Energi & Lingkungan – LPPM ITS.

No.	Nama Contoh	Jenis Uji	Hasil	Satuan	Metode Pengujian
1	Plastik HDPE	<i>Total Moisture</i>	0,20	%Ar	ASTM D 3302-15
		Kadar Air (<i>Moisture In Sample</i>)	0,20	% Adb	ASTM D 3173-11
		Kadar Abu (<i>Ash Content</i>)	1,08	% Adb	ASTM D 3174-12
		Kadar Zat Terbang (<i>Volatile Matter</i>)	98,68	% Adb	ASTM D 3175-15
		<i>Fixed Carbon</i>	0,04	% Adb	ASTM D 3172-13

Suhu : 20^oC
 Humidity : 58 %
 Analis : MBB

Catatan:

1. Hasil pengujian hanya berlaku dari sampel yang diuji.
2. Laboratorium tidak bertanggung jawab atas kerugian pada pihak ke tiga.
3. Laporan hasil pengujian hanya diperbanyak secara utuh.


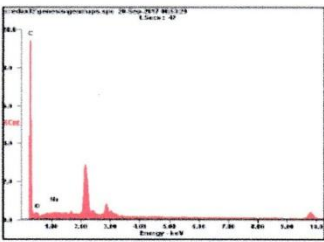
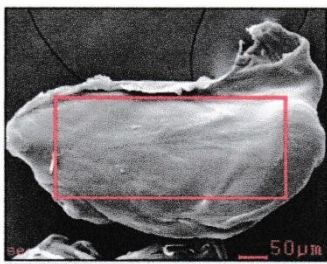
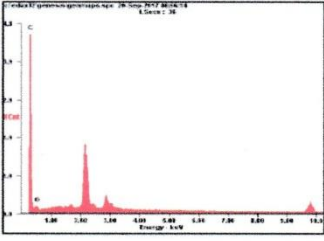
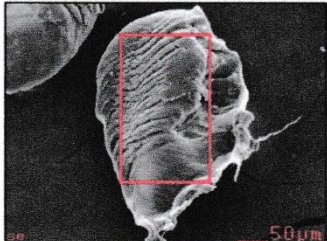
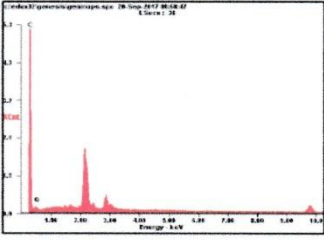
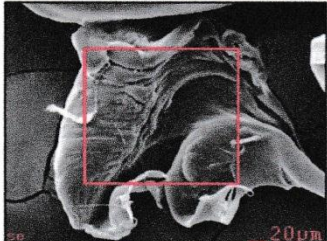

Manajer Puncak
 Laboratorium Energi dan Lingkungan

Dr. Ir. Susianto, DEA
 NIP. 19620820 198903 1 004

Manajer Teknis

Vita Yuliana, S.Si
 NIP. 914014001

Lampiran 5. Laporan hasil uji SEM-EDX sampah plastik HDPE

	<p>UNIVERSITAS NEGERI MALANG FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM LABORATORIUM MINERAL DAN MATERIAL MAJU (LABORATORIUM SENTRAL) Jalan Semarang 5, Malang 65145 Telp. 0341-551312 (psw 200) / 574895 / 085106001088 E-mail : laboratoriumsentralum@yahoo.co.id Website : central-laboratory.um.ac.id</p>																
<p><u>LAPORAN HASIL UJI</u> LSUM.LHU.B.00322.2017</p>																	
<p>Nomor Pengujian : LSUM.P.00318.2017 Nomor Sampel : B217 – HDPE Nama Pelanggan : Rita Fajar Instansi : UB Jenis Karakterisasi : SEM/EDX Sampel Diterima Tanggal : 20 Juli 2017</p>																	
<p>Hasil</p>																	
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Wt%</th> <th>At%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CK</td> <td>90.20</td> <td>92.86</td> </tr> <tr> <td>OK</td> <td>07.95</td> <td>06.15</td> </tr> <tr> <td>NaK</td> <td>01.85</td> <td>00.99</td> </tr> <tr> <td>Matrix</td> <td>Correction</td> <td>ZAF</td> </tr> </tbody> </table>	Element	Wt%	At%	CK	90.20	92.86	OK	07.95	06.15	NaK	01.85	00.99	Matrix	Correction	ZAF	
Element	Wt%	At%															
CK	90.20	92.86															
OK	07.95	06.15															
NaK	01.85	00.99															
Matrix	Correction	ZAF															
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Wt%</th> <th>At%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CK</td> <td>93.24</td> <td>94.84</td> </tr> <tr> <td>OK</td> <td>06.76</td> <td>05.16</td> </tr> <tr> <td>Matrix</td> <td>Correction</td> <td>ZAF</td> </tr> </tbody> </table>	Element	Wt%	At%	CK	93.24	94.84	OK	06.76	05.16	Matrix	Correction	ZAF				
Element	Wt%	At%															
CK	93.24	94.84															
OK	06.76	05.16															
Matrix	Correction	ZAF															
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Wt%</th> <th>At%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CK</td> <td>89.86</td> <td>92.19</td> </tr> <tr> <td>OK</td> <td>10.14</td> <td>07.81</td> </tr> <tr> <td>Matrix</td> <td>Correction</td> <td>ZAF</td> </tr> </tbody> </table>	Element	Wt%	At%	CK	89.86	92.19	OK	10.14	07.81	Matrix	Correction	ZAF				
Element	Wt%	At%															
CK	89.86	92.19															
OK	10.14	07.81															
Matrix	Correction	ZAF															
<p>Keterangan :</p> <ol style="list-style-type: none"> Hasil analisa hanya berlaku untuk sampel yang diuji Dilarang menggandakan sebagian laporan hasil pengujian tanpa persetujuan tertulis dari Laboratorium Mineral dan Material Maju. 																	
<p>Malang, 20 September 2017 Kepala Lab. Mineral dan Material Maju  Drs. Abdulloh Fuad, M.Si NIP. 196302221988121002</p>																	

Lampiran 6. Hasil uji nilai kalor sampah plastik HDPE



KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
 UNIVERSITAS BRAWIJAYA
 FAKULTAS TEKNIK JURUSAN MESIN
LABORATORIUM MOTOR BAKAR
 Jl. Mayjen Haryono 167 Malang 65145 Telp. 0341-554291 pes.1222
Cel_mesinUB@yahoo.co.id



DATA HASIL PENGUJIAN:

NO	Nama Bahan	Nilai Kalor (calori / gram)	Rata - rata (calori / gram)
1	HDPE 1	10067.025	10131.492
2	HDPE 2	10115.101	
3	HDPE 3	10212.350	

